陈毓川　赵　逊　张之一　项礼文
蔡爱莉　曹佑功　陈廷愚　编著

世纪之交的地球科学

——重大地学领域进展

TRANSCENTURY EARTH SCIENCES

——Advances in Some Major Fields



地质出版社

责任编辑: 郝 杰　　陈 磊
封面设计: 东方上林工作室

世纪之交的地球科学
—— 重大地学领域进展

TRANSCENTURY EARTH SCIENCES
——— Advances in Some Major Fields



ISBN 7-116-02467-0
P·1833 定价: 30.00 元

世纪之交的地球科学

——重大地学领域进展

陈毓川　赵　逊　张之一　项礼文
蔡爱莉　曹佑功　陈廷愚　编著

地质出版社
·北　京·

内 容 简 介

本书由三部分7章组成。第一部分即第1～5章，论述地球科学一些重大领域国内外的进展，内容涉及全球构造和大陆动力学，能源与固体矿产地质，全球变化和地质环境，基础地质——地层古生物学、矿物学、沉积学、火成岩岩石学、变质岩岩石学、前寒武纪地质学及构造地质学，以及研究地球的新技术新方法等方面；第二部分即第6章，着重阐述地质资源、环境与社会可持续发展的密切关系；第三部分即第7章，在上述研究基础上，提出了地学在21世纪发展的优选方向和对当前可供国际合作的研究项目的建议，以期赢得地学界专家和领导的共识与重视，以便把我国的地球科学研究提高到一个新的水平，为21世纪地球科学所面临的挑战和社会经济可持续发展服务。

本书可供地球科学工作者、科技管理人员和高等院校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

世纪之交的地球科学：重大地学领域进展/陈毓川等编著．-北京：地质出版社，2000.6
ISBN 7-116-02467-0

Ⅰ．世…　Ⅱ．陈…　Ⅲ．地球科学-研究-概况　Ⅳ．P-1

中国版本图书馆CIP数据核字（2000）第30613号

地质出版社出版发行

（100083　北京海淀区学院路29号）

责任编辑：郝　杰　陈　磊

责任校对：田建茹

*

北京印刷学院实习工厂印刷　新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092 1/16　印张：13.75　字数：319000

2000年6月北京第一版·2000年6月北京第一次印刷

印数：1—800册　定价：30.00元

ISBN 7-116-02467-0
P·1833

前　言

人类正在告别以工业经济为标志的20世纪，迎接知识经济蓬勃发展的21世纪。在逝去的世纪中，地质资源是构筑高度的工业文明，造就繁荣的社会经济的重要基础。人类在征服自然、改造自然的过程中，建树了丰功伟绩和辉煌成就。然而，正如恩格斯所说的：人类征服自然的每一个胜利都得到了报复。世人在开垦土地、发展工业、开发矿产、建筑华宅、修路架桥、拦河建坝的同时，改变了生态环境，污染了水体和大气，产生了有害物质，引发了地质灾害。为此，地球科学家正在把注意力转向维护人与自然的和谐。人类的光明未来只能是，也一定是实现社会经济的可持续发展。

新的世纪意味着新的挑战与新的机遇。地球科学家必须把握时代的脉搏，即人口、资源、环境这些影响今后人类社会可持续发展的关键问题，保证矿产资源（包括能源、金属与非金属矿产资源和水资源）的可持续利用并发现新的可替代资源，减轻自然灾害的损失，保护和改善生态环境，这些既是社会可持续发展的紧迫要求，又是推动地球科学技术进步创新的强大动力。

1996年8月在中国北京召开的第30届国际地质大会(IGC)，是本世纪地质学家的最后一次规模巨大的盛会。它肩负着总结20世纪地球科学的巨大成就，展望和探讨21世纪初地球科学所面临的若干重大问题的任务。115个国家和地区的6000多名地学工作者出席了这一盛会，就大陆地质主题——大陆地质构造、能源、矿产资源、地下水资源、地质环境保护和地质灾害防治等领域开展了广泛的学术交流与热烈的讨论。大会反映出来的成果，不仅是对20世纪地学成就的总结，而且其中的那些具有远见卓识的思想，对21世纪人类社会进步和经济发展必将产生深远的影响。为了进一步深入系统地了解世纪之交国际地学研究现状和发展趋势，有必要在大会所反映出来的地球科学各方面的最近进展的资料基础上，参考有关资料，对地球科学中一些重大领域的进展作进一步的分析总结和展望，以期推动地学研究的发展。为此，第30届国际地质大会组织委员会专门立项，责成学术委员会的主要成员完成此项任务。需要说明的是，在此项工作进行初期，俄罗斯科学家表示了共同合作的愿望，并曾对编写提纲进行了磋商。但后来因某些客观原因，中俄两国专家合作编写的设想未能实现。

1992年世界环境与发展大会后，国际上大多数国家都在制定本国的21世纪议程。中国地球科学家瞄准当代地学的前沿和热点，并结合我国地矿资源和地质环境的现状也对此进行了研究。本书也反映了这些工作基础上进一步研究的成果。

本项研究工作虽从1997年开始立项，但由于当年我们赶编《90年代地球科学的动向——第30届国际地质大会学术报导》和组织《第30届国际地质大会论文集》中文版共26卷的编辑出版工作（全集共801.6万字，已由地质出版社出版），因此实际的研究总结工作是从1998年才逐步展开的。本书的第1、2、3、4、5、6、7章分别由曹佑功、蔡爱莉、张之一、项礼文、陈廷愚、赵逊、陈毓川执笔并集体讨论修改定稿。由于本书涉及地球科学

各主要领域，涉及面较宽，而编写者的知识水平有限，虽然尽了最大的努力，并吸收了许多专家的意见，但仍不免存在片面和不当之处，敬请读者批评指正。

2000年8月，第31届国际地质大会（IGC）将在巴西里约热内卢召开。各国地球科学家再次相聚，共同讨论世纪之交的重大地球科学问题。本书亦借此机会，把我们的成果奉献给世界同仁。除中文版外，还将出版英文版。愿本书的出版，能为促进地球科学的发展和人类社会可持续发展起到应有的作用。

在完成此书的过程中，得到许多专家的支持和帮助。他们提出了不少宝贵的意见，特别是张宗祜、郑绵平、赵一鸣、毛景文、李思田、吴必豪、肖庆辉、戴自希、哈承佑、洪大卫、姜春发、王宗起等同仁给本书的编写提供了很大的帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。

著　者

1999年8月于北京

目 录

第 1 章　全球构造和大陆动力学

在跨越世纪的历史阶段，地球科学的发展正进入一个崭新的关键时期——建立地球系统科学的新时代。当代地学前沿研究以地球圈层的相互作用为核心，以岩石圈、全球变化和地球深部内层为三大主题，而全球构造和大陆动力学的研究，正是当代地学前沿的重要组成部分。

1.1　全球构造和岩石圈

1.1.1　引言

长期以来，全球构造和岩石圈研究一直是地球科学研究的中心内容。全球构造研究主要是对全球的构造特征、构造格局和构造演化以及相关理论的探讨。当代的全球构造还涉及深部地质和全球动力学的研究。当前岩石圈研究的目标是通过地质、地球物理、地球化学、大陆科学钻探及空间大地测量等的综合研究，建立全球岩石圈结构、成因和演化模型，特别是大陆的动力学基础，并为矿产资源和能源、地质环境和地质灾害的预测和评价建立模型。从 80 年代起，国际岩石圈研究的重点由海洋转向大陆，研究的主题也由结构、构造演化转为大陆动力学研究。未来相当一段时期内研究的焦点仍然是在进一步深入地了解大陆岩石圈结构的形成、各层圈的相互作用和动力学上。

1.1.2　全球构造

全球构造特征、构造格局及其演变和有关运动学、动力学的探索，至今仍是当代国际地学前沿的一个重要研究领域。全球构造研究需从全球视野出发，把整个地球作为完整的动力学系统来研究，把全球构造格局看作为这一动力学系统演变的结果，而且研究的范围还涉及深部地质问题和太阳系及宇宙的结构和演化问题。

板块构造研究的进展，明显地提高了全球构造，特别是大洋构造的研究水平，推动了地球动力学的研究。目前，当务之急是加强大陆构造研究，进而提出全球构造形成与演化新模式。全球构造与造山运动关系密切，当前研究的重心已转移到大陆造山带，主要是通过造山带的形成与演化的历史和过程来揭示全球构造的演变和动力学过程。

1.1.3　大陆构造与动力学研究若干重要方向和进展现状

为了建立新的地球观，当代地学界把主要科学目标瞄准大陆构造与动力学。这方面的主要问题包括：

1）造山带和盆地的形成与演化

造山带和盆地是大陆的基本构造单元，也是研究大陆动力学的基础。目前，关于大陆造山带和盆地的研究正向系统地探索隆坳转换机制、深部地质过程和动态演化规律方向发展。以下几个方面颇受重视。

（1）造山带的伸展作用

近 10 年来，一些学者相继在科迪勒拉、阿尔卑斯、喜马拉雅等世界著名的造山带发现大规模伸展构造，使之成为当代构造学的热点之一。除在上述年轻造山带中发现伸展构造外，像加里东、秦岭、兴蒙等古老的造山带也显示出明显的韧性伸展和揭顶作用。大多数学者认为伸展构造是造山带形成后重力扩张、伸展塌陷的结果，另一部分人则认为是由于深部岩浆脉动上涌，引起热隆伸展，形成变质核杂岩及相关的剥离断层，这一构造热过程与山脉的隆升、变质核的剥露密切相关。今后造山带研究的一个重要方向是将造山带与相关盆地作为一个有机联系的统一体，深入探讨伸展作用与挤压作用、岩浆活动的时空关系和成因联系，尤其重视造山带多重构造体制的复合形式和转换机制的研究。

（2）沉积盆地的形成机理及深部过程

近年来，沉积盆地的深部构造过程与浅层伸展裂陷的关系受到重视，提出了多种类型的纯剪伸展模式和单剪伸展模式。研究结果表明：尽管大陆坳陷带的表壳伸展构造样式有所不同，但是，活动性沉积盆地都具有高地温梯度，表现出深层高温流变和顺层韧性剪切，浅层裂陷与深部顺层韧性伸展密切相关。然而，迄今为止还尚未提出有代表性的盆地挤压构造模式。

（3）盆-山构造系统的物质运动和构造转换

盆地和造山带是在空间发展和形成机制上具有密切联系的构造系统。造山带（区）地壳显著增厚和沉积盆地（区）地壳大量减薄显示出构造地貌与大陆莫霍面之间的镜像对称关系，其成因可能与不同层圈的差异流变作用和底侵作用有关。由底侵作用引起的壳幔反应和部分熔融产生的壳幔混合物增添到下地壳底部，下地壳热流物质从幔隆区向幔坳区持续流动，不断将盆地底部热软化物质转移到造山带。在深层物质迁移过程中，不仅在浅层次造成盆地扩张与裂陷和造山带相应的挤压与收缩，而且还引起一系列深部地质效应：岩浆从幔隆发源区向幔坳区由基性经中酸性向酸性演化；变质相由高温高压经中温中压向低温低压转化；构造变形由粘塑性流动向韧-脆性剪切转换；活动性沉积盆地因深部物质流失引起质量亏损，造山带则因热流物质大量集积而造成质量剩余，最终导致活动构造区（带）重力均衡异常。

（4）造山带和盆地的热状态

大陆不同构造单元在不同演化阶段具有不同的热状态和热结构，新生的裂陷盆地热活动十分显著，尤其是受底侵作用和壳幔反应影响的下地壳，处于过热的超塑性流动状态，出现大量的部分熔融物质、孔隙流体、席状及透镜状镁铁质侵入体和韧性剪切带，构成以热平流传导为主的、热流物质侧向蠕散的层流层。相应地，在年轻的活动造山带底部出现巨厚的高热流韧性流层或低速高导层，随着盆-山构造系统的热转换和热耗散的持续作用，造山带和盆地趋于稳定，出现老化现象，最终被夷平、冷却和固化，形成稳定的克拉通，地温梯度明显降低，岩石圈结构相对均一化，缺少活动的低速层。

2）大陆岩石圈的分层结构及流变性质

当代大陆构造和动力学研究的一个重要趋势是重新认识和评价大陆岩石圈的结构、强度、成分和流变性质，特别是重视大陆岩石圈在横向和垂向上的不均一性。大陆岩石圈的分层流变现象十分显著。研究表明：①大陆岩石圈是由 20～30 km 和 40～60 km 的两个韧性层及由此分隔的两个脆性地壳层和一个上地幔脆性层组成；②大陆岩石圈是由下地壳韧性层和上、下两个脆性层构成的“三明治”结构；③随着应力增加，大陆莫霍面之下的上

地幔流变转换带附近发生流变软化和应变局部化，韧性层向下拆离；④大陆岩石圈不同于刚性的大洋岩石圈，具有显著的结构和强度不均一性；⑤具有不同构造活动性的大陆构造带或构造域，其分层流变性有很大的差异，显示出地温场分区、应力场多变的特点。

3）大陆下地壳的构造性质及变形特征

一般认为，陆-洋体制的构造转换是由下地幔巨大的热流体系的物质运动所推动的。陆-洋体制的岩浆活动是亲地幔型的，以沿大洋扩张中脊呈带状展布的超镁铁质岩为典型代表。陆内隆-坳系统的岩浆活动显示为亲地壳型。尽管在大陆伸展区出现基性岩浆和壳幔混合作用，但其成因仍与地壳底部镁铁质岩的底侵作用及相关的壳幔反应和部分熔融关系密切。一些人将下地壳作为大陆动力学的主攻目标，试图以研究大陆下地壳的物质组成、热状态、流变状态、变形变质作用和物质运动规律，进而探讨大陆深部构造过程与浅层构造活动的内在联系，总结大陆构造系统的物质运动规律。

近年来，人们详细研究了天然剥露的下地壳高级变质岩区、深源包体和深地震反射剖面，发现在大陆活动区的下地壳存在近水平的地震组构，发育流体富集的伸展性韧性剪切带。这种具有强烈流变性质的壳内流层或韧性流层是在地幔上拱背景下构造热活动的产物，所以，大陆下地壳可看作是在一定时空结构中随构造活动性转化而变化的构造岩石组合，其形成时代可以很新，一般来说，活动带的下地壳及莫霍面的形成时代晚于中、上地壳，并与其相关的造山-造盆作用大致同期。显然，大陆地壳浅层断块构造活动与其深部物质层流运动密切相关。

4）大陆地震活动规律及其成因

通常认为，地震是构造活动的产物，因而地震也可以作为建立构造模型的标志和检验构造理论的标尺。大陆地震分布具有规律性。据马宗晋等的研究，大陆地震在地壳中、上部一定深度范围内呈优势分布，称为易震层或多震层。这些多震层是蕴震的介质层，被活动的发震断裂切割、错动而发生地震。所以，大陆地震呈层状漫散分布、带状局部集中，主要受近水平的地震作用力控制。

控制震源深度和影响地震活动的主要因素包括：地壳厚度、地壳分层结构、低速高导层发育程度和热流值高低等。大陆地震主要发生在强烈的构造热活动区，特别是年轻的造山带和新生的裂陷盆地，并沿着活动的走滑断层、逆冲断层或伸展性断裂成带集中分布。地震带在一定的时空结构中随着构造发展而发生迁移，马宗晋认为地震迁移现象是波的传播过程，而不是地震断裂的连续伸延。许多人认识到大陆地震活动与地壳深部韧性流层的物质运动、低速层与高速层之间的层间滑动有关，而难以用板块俯冲或碰撞模式进行解释。

5）大陆构造活动的动力学机制

大陆地壳历史悠久，大陆构造形式多样，大陆结构十分复杂。鉴于大陆构造的复杂性，一些学者认为大陆的地壳运动是由多种动力源复合而成的，大陆构造难以用一种统一的模式进行综合概括。

具有分层流变的大陆地壳也显示出分层受力特征。大陆地壳上部脆性域的构造变形主要受应力控制，破碎作用和摩擦滑动是主要的变形机制。一般认为，大陆内部复杂多变的应力状态主要受深部物质运动的制约。大陆地壳下部韧性域热软化现象十分显著，尤其是低速层发育的活动构造带，热流值通常很高。在底侵作用的伸展区，热点之上的莫霍面温度可达 1200℃。与此密切相关的热力作用不仅引起热点活动区发生壳幔反应和部分熔融，

形成粘性流层，造成大陆地壳的垂向生长，而且还制约了大陆下地壳的流变状态和物质流动规律，具有非线性动力学特征。

1.1.4 岩石圈

多年来，全球岩石圈研究一直是地球科学研究的热点之一。迄今为止，人们对大洋和大陆岩石圈的物质成分、结构、构造、动力学及其演化，对造山带和俯冲带与现代动力学等已进行了大量的研究，并进行了跨学科的交叉与综合，采用了多种高新技术，进行了定性与定量分析；对固体地球岩石圈的研究，已获得了很大的进展。现已认识到，大陆岩石圈不是统一的简单的刚性体。岩石圈长期处于不断变化之中，如发生裂解与拼合，水平位移，沉降与隆升，侵蚀与沉积，变形与变质，岩浆与流体的喷溢及各种作用等。岩石圈与上下，周围圈层不断发生着相互作用。当今和未来相当一段时间内，对岩石圈的研究将仍以大陆岩石圈为重点，着重了解大陆岩石圈的形成，各层圈的相互作用和动力学过程。并重视岩石圈深部、内部作用的研究。

1.1.5 大陆岩石圈和深部作用研究的关键问题

在大陆岩石圈和深部作用研究方面，正面临着若干需要新的知识层次上攻关的关键科学问题，概括如下：

（1）大陆的生长机制和成因

大陆的生长机制和成因一直是当代国际地学界研究的难题之一。大陆地壳至少有 4200 Ma 以上的历史，已成为地球主要历史的惟一档案资料库。大陆的情况远比海洋复杂得多，具有很多特殊性，陆壳的生成和演化与板块构造的关系至今不清，一些重大疑题仍有待解决。

（2）大陆地壳的结构、构造和动力学

自从大陆超深钻成果否定了地壳双层结构以后，引起了人们对地壳结构的重新认识，至今尚未建立起可信的地壳模型。今后要建立起可靠的地壳结构、构造模型，还有赖于地球物理方法的进一步改进和超深钻成果的证实和修改。

（3）大陆莫霍面的性质及其动力学

大陆莫霍面在时间上和空间上都具有动态性质，在大陆岩石圈生长及演化和运动过程中都具有重要作用。因此，深入研究莫霍面的构造性质、状态和组成及其动力学意义，就成为当代岩石圈研究的重要课题之一。

（4）岩石圈的结构分层和流变性质

岩石圈的结构分层和流变性质是控制大陆构造形成演化，尤其是控制大陆构造变形的主导因素之一，也是探讨大陆动力学的基础。因此，对岩石圈结构分层和流变性研究也就成为当代重要的前沿课题。

（5）深部作用及其过程

21 世纪人类将面临能源、矿产资源、环境和灾害等重大社会问题。而上述问题要取得进展，最关键的是要深入了解地球深部正在发生的各种地质作用机理，即要了解深部化学作用和物理作用及其演变过程，为解决当前人类面临的重大社会问题提供途径。

（6）地壳与岩石圈地幔的连结作用

大陆地壳和岩石圈地幔是否具连结作用，如果两者发生拆离，其性质和范围以及位移的运动学和动力学等是什么特征，这些都是涉及到大陆变形体系和大陆动力学的基本问题。

它们不仅对认识地幔流动的空间与时间变化具有重大意义，而且由其产生的所谓地壳动力学、大陆动力学与地幔动力学之间的关系就成为今后研究地球动力学中最重要的前沿课题之一。

1.1.6 大陆岩石圈和深部作用研究进展现状

80 年代国际岩石圈计划的实施以及 90 年代该计划的延续，极大地丰富了人们对地壳和岩石圈地幔的物质组成、结构构造、物理化学状态及演化规律的认识，取得了显著的进展❶：

1）大陆的生长机制和成因方面

（1）板块构造学说提出后，人们普遍认为，陆壳的水平侧向增生是地壳生长的主要方式。但近年来的研究发现，中下地壳的年龄要小于上地壳。因此，由下垂直向上的增生作用也是地壳生长的重要方式之一。国外资料报道，在地幔上涌而又能产生玄武质岩浆的任何地方，如俯冲带上部、大陆裂谷带或板内构造环境都能发生底侵垫托的造壳作用，说明地壳物质由下垂直向上的增生作用与水平增生作用同样重要。地幔可能是地壳物质生长的重要源区之一。

（2）研究还发现，底侵垫托作用不仅是地壳增生的一种方式，而且也代表着麻粒岩相的变质事件，对造山带向克拉通方向的转化具有重要意义。在现代伸展地区的下地壳广泛发生底侵垫托作用，其热流值远远高出稳定克拉通地区，表明这些地区的下地壳正在发生麻粒岩相变质作用。

2）大陆地壳的结构、构造、组成和动力学方面

（1）近年来的研究已揭示出，地壳呈复杂的不连续的多层结构。其中一些内部已发生了非常复杂的变形位移。

（2）研究成果表明，大陆地壳深部由一系列水平或近水平和一些倾斜反射体组成。据此推测大陆深部地壳在造山带和伸展地带都是由一系列水平构造片体组成的，它们在纵向和横向上极不均一，产生了大规模的、多层次的板片、岩片的推叠和侧向伸展位移，于是出现了薄皮构造、拆离构造、逆冲推覆构造、鳄鱼构造、韧性剪切带、构造楔、变质核杂岩的多种伸展构造以及薄皮板块构造等新概念和新理论，并由此形成俯冲造山、碰撞造山、增生造山、陆内造山、裂谷成盆、伸展造盆造山等造山造盆假说和理论。这些重要发现既是建立当代地学理论的基础，也是未来建立大陆地壳结构模式的根本。

（3）大陆不同构造单元具有不同的岩石圈结构，它们构成了大陆演化的一个系列。岛弧、造山带、年轻的稳定地壳、花岗岩/流纹岩区和地盾这五大类不同的构造单元分别代表了大陆演化的不同阶段，它们的地震反射特征很不相同。但是，对于相同的构造单元而言，虽然它们处在不同的全球构造背景或不同的演化阶段，但往往呈现出较多的共性。

（4）研究证实下地壳的平均成分是接近幔源玄武岩的镁铁质岩石，中地壳则是富 K、Th 和 U 的中性成分。

3）大陆莫霍面的性质及其动力学方面

近 10 年来的研究发现，大陆莫霍面是一种随构造作用而变化的动态构造形迹，是一种

---

❶ 白星碧．1994．国外大陆深部地质研究的一些进展．见：中国地质矿产信息研究院编著．形势与挑战．265～280．

地质上年轻的构造形迹。大陆莫霍面的活动性是上地幔和下地壳的重要属性，也是造成大陆板块变形和运动的重要原因。

大陆莫霍面活动性主要表现为：

（1）年轻造山带的莫霍面构成很深的山根，但古老造山带的山根已受到破坏，变得水平或消失。

（2）莫霍面是一个相当年轻的"叠加构造"，表现在一些造山带是古老的，但其莫霍面却是非常年轻的。

（3）大陆莫霍面构造具有明显的侧向变化。在不同的构造区，其莫霍面的活动性并不一样。虽然它是全球性的不连续面，但在厚度和深度上都表现出极大的复杂性和侧向可变性。

（4）莫霍面是大陆内部变形的力学界面，莫霍"拆离面"可能是岩石圈内部结构和运动的最基本的组成部分，起着将地壳与地幔拆离的作用，在大陆地壳变形中有着极其重要的意义。

（5）莫霍面往往是一个厚达数公里的过渡带。这个过渡带既表现出明显的构造和岩石的复杂性，又显示出性质和深度上的强烈侧向变化。

综上所述，莫霍面不但是一个地质或地震界面，而且还是地下岩浆作用、构造作用、成矿作用等各种深部地质作用的重要场所，其不仅控制着大陆岩石圈的运动学和动力学过程，而且也往往控制着深部的地质作用过程。

4）岩石圈的结构分层和流变性质方面

（1）80 年代岩石圈研究的一个重大进展是发现大陆岩石圈与大洋岩石圈有一个根本不同的特点，即它不是简单的均一的刚性体，而是具有多层结构和广泛流变等特征。大陆岩石圈横向与垂向上结构、组成的不均一性，显示它具有分层、分块的特点。

（2）多年来的研究表明，岩石圈随深度增加，因受温度增加的影响，其岩石强度将逐渐变弱，由脆性转为韧性。在岩石圈下部随着温度的上升，岩石产生蠕变，并引起矿物的重结晶，使其力学的强度急速丧失而形成韧性层。通过莫霍面进入上地幔以后，岩石性质发生极大变化，但岩石强度变化不大。

（3）研究还发现，陆壳和洋壳的流变性质明显不同。在同样的温度压力条件下，洋壳要比陆壳更坚硬。大陆岩石圈与大洋岩石圈最根本的差别是其流变分层具"三明治"结构，即上部地壳和上地幔为脆性，夹在其中的下地壳具韧性特点，表明大陆岩石圈流变特性与大洋岩石圈不同，因而在动力学性质上也有根本的差异，从而产生了大陆动力学或地壳动力学概念。

（4）近期的研究还发现，就岩石圈本身而言，其流变性质及其结构也是极不均一的。在大陆不同的构造带（构造域），其流变性质与结构有很大的差异，显示着地温场分区、应力场多变的特点。在板块俯冲带，因为岛弧岩浆活动，地下增温率高，下部地壳也可能成为力学边界，而地幔也会在较浅部形成低速层。在大陆活动区，下地壳存在近水平地震组构，发育流体富集的伸展性韧性剪切带，而且大陆地壳浅层断块构造与其深部物质层流运动密切相关。

5）地幔物质及动力学研究方面

（1）近几年来，对地球物质的物理化学性质的认识，推动了对地幔乃至地核结构构造

的认识。早在70年代人们就已经发现地幔具有广泛的侧向不均匀性和各向异性，近年来进一步发现了地幔在各种不同尺度上的化学不均一性，它可能是地幔各向异性以及地幔对流的原因。地幔物质研究的另一进展是，人们近来通过地幔捕虏体温压平衡计算，得出了组成地幔的主要矿物在深部赋存的状态以及地幔岩浆侵位的途径，进而得出了地下200多公里范围之内的地温曲线。研究表明，地幔岩浆在高温和低温环境下会沿不同的路径上升，岩浆组成会呈现出不同的组合。

(2) 近年来研究表明，引起岩石圈板块运动的机制并不仅仅限于地幔热对流模式，地壳物质的物性以及相分离和相变引起的密度变化也是地球深部动力学的基本因素。人们对地幔动力学的研究又上了新台阶，相应地出现了一系列新的假说，包括巨型地幔柱构造、地幔粘性流模式、颤动构造、对流构造、地幔泡、地球自转等。

在众多的地幔动力学假说中，巨型地幔柱构造以及地幔粘性流模式和颤动构造已经引起人们普遍关注。

①巨型地幔柱构造模式，将地核、地幔、地壳纳入到一个全球构造体系中，并认为俯冲岩石圈板片向下运动到670 km这一重要界面时会停留、屯积一段时间，然后崩落下沉。当达到核幔边界时会在那里引起热状态扰动，从而产生超级地幔羽，并在其他的部位导致下地幔物质上涌。这种巨型地幔柱随着其演化发育过程会引起岩石圈的上隆和大范围的火山活动。这一全新的地幔对流模型的优点在于，它把地幔对流看作是壳幔循环系统，认识到了地幔在全球动力学演化中的主动性和活动性，可以较好地解释岩石圈构造和演化的动力学。

②地幔粘性流动模式认为，地幔物质成分分布极不均匀，大陆克拉通之下富含放射性元素，大洋之下则亏损；从岩石圈返回到地幔中的碳酸盐作为缓冲剂有效地通过变质作用、交代作用等调节了地幔的有效粘度并使它维持在一定的范围之内；热流分布的数值、同位素配分数值都说明地幔流在克拉通中部之下向上隆并向两侧流动，温度和化学成分梯度是地幔流动的主要动力。这一模式解释了洋中脊构造、裂谷构造、洋底磁异常条带、He、Ne等元素循环、太古代绿岩带、大陆生长、太平洋中生代演化、热点及岛弧链等一系列地学中的重大问题。

③颤动构造学说认为，岩石圈上部55 km处存在一个与软流圈相连通的全球性岩浆通道（颤动通道），地球上所有现代活动带均与这些颤动通道有关。

6) 核幔边界及内外核研究方面

(1) 以前人们认为核幔边界仅是物质成分和物性过渡面。近年来的研究表明核幔边界是一个动荡起伏的表面，变化范围可达200～300 km。同时还发现核幔边界上的热和化学成分分布都不均一。核幔边界是核幔物质反应和进行交换的重要场所。还发现核幔边界顶部的波速不连续性具有明显的侧向变化。

(2) 近几年来，人们又发现了外核中地震波的传播速度存在各向异性。

(3) 地球内核与其他层圈间的相互作用研究也引起了人们注意，并有重大突破。1996年内核旋转的发现，强化了层圈之间相互作用的认识。宋晓东等（1998）的研究，首次发现并测量到地球内核的运动，并且发现内核跟地球朝同一方向旋转，但每天旋转一圈的速度要比地壳和地幔快。经证实，内核正以约1°/a的速率相对于地幔向东转动。内核赤道比位于赤道的地壳每年多旋转19.31 km。在过去100年中，这种相对较快的转速已使内核比

地球多旋转了约 1/4 圈。即地球内核在地球内部旋转一周需要约 400 年。另外还发现，内核的运动比一般的构造运动快得多，如内核运动比大陆漂移的速度快约 10 万倍。这一发现对解决地磁场起源问题意义重大。内核的旋转是由穿过内核的地震波的传播随时间变化推测得到的，这种变化是因内核各向异性在空间方位的改变所造成的，而内核的各向异性被认为起因于各向异性的铁晶体的有序排列。地震学观测到的内核差速旋转为最近的发电机数值模拟提供了支持，这种数值模拟曾预测：导体内核与外核产生的磁场的电磁耦合驱动了内核每年几度向东旋转。地核通过核-幔边界的接触及内核与地幔的引力耦合与地幔存在强烈的相互作用。

1.1.7 我国岩石圈研究的一些进展

1）通过对中央造山带、兴蒙-北疆造山带、滇川西部特提斯造山带和“华南及邻近海域的岩石圈结构与演化”研究，提出“岩浆型被动边缘”、“多岛洋”的概念以及“微陆块软碰撞弱造山的非威尔逊旋回造山模式”，初步建立了对我国大陆岩石圈演化和动力学的整体认识。

2）通过对华北北部麻粒岩相带地质演化及其深成地质作用研究，在麻粒岩相带南亚带内，首次发现高压麻粒岩和退变榴辉岩岩片，提高了我国前寒武纪岩石圈的研究水平，为深入理解克拉通形成的地球动力学过程和深部地壳出露机制提供了重要依据。

3）通过对南海和东海陆-海接合带地壳结构的联合探测，查明了从陆架-斜坡-深海盆地的岩石圈分层结构：南海陆架区的地壳厚度为 30 km，属大陆型地壳；斜坡区地壳厚度为 28～22 km，其中下地壳（8 km）向洋盆方向迅速减薄并尖灭，属过渡型地壳；中央海盆地壳厚度为 8 km，属大洋型地壳。提出了冲绳海槽热流体力学模型和南海盆地演化 3 个扩张期的认识。

4）依据中国东部火山岩的研究，论证了中国东部岩石圈热减薄作用，提出第三纪以来，岩石圈减薄了 80 km；近年又通过古生代/中生代巨厚岩石圈（根）的比较，进一步提出了这一热减薄系通过岩石圈去根作用实现，减薄事件始于侏罗纪。

5）青藏高原及其邻区岩石圈结构及地球动力学研究方面

（1）喜马拉雅地区深反射地震试验获得突破性成果

①发现了地壳中部 28～40 km 深处一组强反射带，命名为主喜马拉雅逆冲断裂带（MHT）；提出了印度陆壳或下地壳沿此拆离带向西藏地壳之下俯冲的新认识；

②在拉萨地块中的上地壳部位产生了厚约 20 km 的大规模熔融层，而且雅鲁藏布江北的熔融体成层，雅鲁藏布江南的熔融层成条带状产出，表明碰撞挤压过程中发生的地质作用在雅江南北是不同的；

③雅鲁藏布江大断裂并没有一直向下延伸，它在上地壳十几公里处被一年轻的断裂所截切；

④青藏高原的莫霍面深度较深，在喜马拉雅山脊处的荡拉及以南帕里，莫霍面深度达 75～73 km，向北倾斜延伸可加深到 80 km，在更深部位还发现了第二莫霍面；

⑤在上地幔内地震波速的±32～36.4 s、34～41.6 s 和 38～46.2 s 等处发现有延续较长的同相轴，推测是岩石圈和上地幔内反射层，岩石圈地幔厚约几十公里；

⑥上地壳厚度大，达 30～40 km，反射图像十分复杂，表现为叠瓦状结构和陡坡结构，藏南滑脱系和叠覆增厚明显；

⑦下地壳反射图案与上地壳不同，表现为几个反射带短而平行，并有起伏和断错的特点，总体上显示了更多的塑性和流变性。

通过对深部信息进行综合分析和论证后，获得了如下新认识：在地质史上，印度大陆与欧亚大陆的拉萨地块碰撞后，在地下深部产生了多次向北的俯冲，有的俯冲面延长达150 km以上，使地壳增厚；还证实印度大陆现在仍在向北运动着，对中国大陆施加着巨大的挤压作用。正是两大板块不断的俯冲、挤压、叠覆和熔融等作用使地壳增厚，构成了喜马拉雅造山运动。

(2) 通过对青藏高原北部邻区（昆仑造山带、柴达木盆地、祁连山带、河西走廊盆地、北山）的综合调查和地球动力学研究，获得以下新成果：

①发现壳内20 km附近普遍存在低速层，南祁连地壳巨厚（74 km），具有青藏高原厚地壳特征，而北山地壳薄，平均为45 km；

②通过近垂直反射地震剖面发现，金塔以南的宽滩山存在一条隐伏大断裂，下切到中、下地壳，推测为青藏岩石圈北缘的边界断裂；

③将该区域划分为5个构造带和6个不同性质的地体。提出了印度板块向北为主，西伯利亚板块向南为辅的双向挤压，以及通过壳内滑脱和西侧逆冲推覆是本区大陆岩石圈变形的主要力源的地球动力学模型。

(3) 青藏高原现代地壳运动与变形研究的新进展

首次在青藏高原采用三维线弹性构造应力模拟方法，结合GPS复测数据求得了青藏高原现今构造应力场，结果表明，压应力方向在喜马拉雅块体近正北方向，而北部块体为北北东，压应力轴倾角近于水平，主张应力在高原中部近于东西向。

在青藏高原北部及邻区测得每年地壳变形速率及地壳变形呈现逆时针涡旋运动趋势。监测结果表明，从全球构造角度看，青藏高原北部及邻区相对欧亚板块稳定部分的水平运动速率变化为7.99～32.4 mm/a；并求得了青藏高原北部及邻区相对于成都的地壳运动，其水平运动速率变化为1.49～26.4 mm/a，总体呈现逆时针涡旋运动趋势。

1.1.8 全球构造和岩石圈研究展望

当代全球构造和岩石圈研究已进入以大陆动力学为中心的新时期。由于一系列新技术、新方法的运用，研究已经取得飞跃的进展，但就其研究最终目的之难度而言，已进入了更为艰巨、更为复杂的新的历史时期。

随着高、新技术的不断发展，新技术、新方法的不断涌现，跨学科的综合研究与交叉学科的相互渗透，使全球构造和岩石圈研究有可能获得突飞猛进的发展，将会带来重大发现和理论突破，在创立新的大陆构造成因模型和地球观理论方面取得丰硕成果，并在资源开发利用、环境与生态保护和灾害防治等方面作出巨大的贡献。

1.2 大陆动力学

1.2.1 引言

大陆动力学涉及资源、能源的开发，环境与生态保护和减少灾害等重大问题，与社会、经济持续发展紧密相关。

20世纪70年代以来，板块构造理论的出现和兴起曾是地学界的一次重大革命，地球科

学主要是通过板块构造的研究得到不断的发展和深入。尽管板块构造学说解释了全球构造的许多现象，但是其更多地适用于大洋岩石圈。大陆地壳的结构、形成和演化远比大洋复杂得多，因而在解释大陆地区的基本问题方面仍有局限性。因此，近年来大陆动力学就成为国际地学界关注的焦点。

大陆动力学的核心是把大陆作为一个独立系统来研究，它通过对大陆地质构造形迹和物质成分的研究，来阐明大陆与整个系统是怎样相互作用的，最终目标是建立大陆形成和演化的新模式。

1.2.2 全球动力学与大陆动力学

地球是一个由相互作用的各圈层组成的完整的动力学系统。全球动力学旨在研究地球的整体运动，地球内部各圈层的相互作用及其与表层间的相互作用和表层构造变形的力学过程。

大陆是由众多地质作用过程形成和改造的各种成分构成的一个大拼合体。它经历了长达几十亿年的、多种不同性质的动力学过程的叠加和改造，记录了地球动力学最完整的演化过程和演化历史。大陆和大洋的演变，都受全球动力学过程的控制，为同一地球动力学过程，但就岩石圈尺度而言，大陆和大洋岩石圈有着很大不同。大陆下面软流圈不具全球意义，大陆岩石圈缺乏刚性，其动力作用过程与大洋也有很大差别。大陆岩石圈 生长和消亡的演变过程远比大洋岩石圈复杂得多，至今仍未建立可供解释的力学模式。大陆动力学研究的核心问题是大陆岩石圈物质增长、消减和保存的演化过程。大陆动力学过程是全球动力学过程的一个组成部分，因此要把大陆作为一个独立的动力学子系统来研究，寻找出主要驱动力、局部过程和构造变形间的相互联系，建立大陆动力学模型。大陆动力学是全球动力学研究的基础，只有对大陆动力学研究有较大的进展和较深入的了解，全球动力学问题才可能解决。

1.2.3 大陆动力学提出的背景

板块构造学说诞生后，国际上先后实施了地球动力学计划和岩石圈计划。地球动力学计划的实施，广泛地开展了对混杂岩、蛇绿岩、蓝片岩、裂谷和岛弧构造等的研究。其研究结果表明，板块构造可以登陆，从而在全球范围内开展了大陆古板块的再造。80年代岩石圈计划的实施，板块构造在大陆上的适用性得到进一步验证，但同时也发现了大陆的复杂性和特殊性，由于板块构造的模式对于大陆构造过于简单，大陆的许多重大科学问题仍未解决，显示了板块构造在大陆上的局限性。如何解决大陆复杂性的诸多问题，是当代地学界亟待解决的前沿课题。90年代以来，世界发达国家竞相出台探索地球动力学的研究计划，美国继“固体地球科学现状和研究”之后，推出“大陆动力学”研究计划、“地球深部内层”研究计划；日本正实施“地球多层圈相互作用、演化和节律”计划；俄罗斯正在继续进行“岩石圈地球动力学”研究和“深部研究远景计划”。欧洲诸国联合开展了“欧洲地学大断面”研究。美国、日本、俄罗斯、德国、法国等国家对正在继续进行的大陆科学钻探，增加了大陆动力学的研究内容。英国在研究地球科学战略的要点中，纳入了大陆动力学的研究。我国有关大陆动力学的若干研究正在启动或实施中，如青藏高原、“秦岭造山带”和苏鲁地区的大陆科学钻探等。通过上述研究，旨在解决板块构造在大陆的局限性，建立大陆动力学理论或超越板块构造的新全球观的大陆构造新模式。

1.2.4 大陆动力学研究的科学目标

由于板块构造理论并未阐明大多数动力学作用，特别是发生在大陆地区的作用，也没有解释大陆内部复杂性和特殊性的诸多问题，因此，大陆动力学旨在研究重大的大陆基本科学问题，以大陆和大陆的构成块体的成因、结构、过程和历史等基本问题为主题，最终目标是建立大陆形成和演化的新模式。其具体科学目标概括如下❶：

（1）大陆的成因和演化

什么是大陆的基本特征，大陆究竟是如何形成、变形和裂解的，大陆又是如何保留的，大陆生长过程中怎样形成沉积盆地；

（2）大陆下面的地幔及其与大陆的相互作用

大陆与整个地球系统是怎样相互作用的，大陆之下的上地幔具有何种特性，如何了解地幔和地幔中的深部陆根，如何了解驱动大陆的地幔对流过程；

（3）地震的性质及板块边界的相互作用

决定大陆物质在活动板块边缘上的物理作用和化学作用是什么，何种动力学机制控制地震，怎样才能充分监控地震过程；

（4）大陆中岩浆的成因和动力学

岩浆是如何产生的，它们在各种深度与地壳是如何相互作用的，不同类型的岩浆具有地幔构造的何种特征，来自陆壳的物质是否通常会再循环到地幔中；

（5）大陆岩石圈的变形和活动性

在大陆变形过程中出现怎样的物理过程，大陆对外部驱动力是如何响应的，它与深度和地质环境是什么依赖关系，诸如伸展断层、克拉通内盆地、板内地震、高原隆升、被动边缘沉降和盆地/山脉构造等现象，可以表明关于驱动力及地壳和下伏地幔条件方面的什么信息；

（6）作为气候和全球变化研究关键的地球系统历史

最近 5 Ma 发生了何种重要的气候和环境变化，什么是影响气候系统的主要构造和火山作用；

（7）大型沉积盆地的成因和演化

陆壳变形是如何驱动陆内堆积物的变形和充填的，在大陆裂谷作用的早期阶段发生了什么；

（8）地壳-水圈的相互作用

什么是地壳流体调节地壳岩石动力学和化学性质的主要方式。

1.2.5 大陆动力学研究进展现状

近十多年来由于一系列新技术、新方法的广泛应用，在大陆岩石圈及其内部各主要构造单元的研究方面，获得了许多新的发现和新的认识，主要有❷❸：

1）大陆岩石圈的概念需要更新，大陆软流圈可能不具全球性质

（1）近年来的研究表明，一些大陆的古老地块下面往往缺失软流圈，或软流圈发育不

---

❶ 李晓波等译. 1993. 美国大陆动力学研究的国家计划. 中国地质矿产信息研究院. 1～6.

❷ 肖庆辉. 1998. 大陆动力学研究中值得注意的几个重大科学前沿. 中国地质矿产信息研究院.（内刊）.

❸ 李晓波. 1994. 大陆研究进展：从板块构造到大陆动力学. 见：中国地质矿产信息研究院编著. 形势与挑战. 243～254.

好，下伏在地壳之下的地幔被牢固地贴在上覆的大陆上，构成了很深的大陆根（柱），向下延伸可达 400 km，实际上构成了下伸到上地幔中的大陆井。这些大陆根的存在，对上地幔的对流格局产生了一定影响。

（2）大洋岩石圈可视为一个位于软流圈之上的年轻的薄的火山岩层，它位于地幔对流层之上，它既是地幔对流系统的地表热边界层，又是使板块构造具有刚性特征的力学边界层，而且还是作为板块或新地壳在大洋中脊诞生的分异产物的化学边界层。但大陆就不同，一些地段软流圈缺失，岩石圈和软流圈界线模糊，大陆的化学边界层和热边界层与岩石圈不吻合，要比大洋厚得多和老得多，而且力学边界层也与大洋不同。显示了大陆岩石圈与大洋岩石圈具有不同的特性。

（3）认识到大陆并非由单一的刚性体组成，而是由多种不同作用形成的低密度岩石的非均质集合体。否定了大陆岩石圈刚性板块模式，建立了非均一的三维粘弹性新模式。

2）威尔逊旋回解释不了大陆造山作用的全过程和复杂性，非威尔逊旋回在大陆造山带可能起主导作用

（1）板块构造学说认为造山带是板块汇聚作用的产物，碰撞后没有大的构造作用，只有风化剥蚀等活动。但 80 年代中期以来，发现大陆碰撞之后构造活动依然强烈，表现为山脉隆升、构造伸展作用、岩浆活动以及随后的垮塌作用等。此外，在若干造山带核部发现含柯石英、金刚石的超高压变质岩（如我国大别、苏鲁地区，哈萨克斯坦北部），推测其形成深度可能大于 100 km，单靠风化作用是剥露不出来的。这些发现表明造山带在板块碰撞之后依然非常活跃。

（2）关于碰撞之后的造山过程有两种比较成型的模型：拆沉作用和伸展垮塌作用。拆沉作用是指板块碰撞之后造山带底下岩石圈地幔部分发生快速机械减薄，与上覆的地壳相剥离而下沉到更深的地幔中。这一模式对解释造山带厚度内部比外部薄、造山期后的岩浆成因、超高压变质带的形成与剥露和壳幔再循环等问题有着独到之处。伸展垮塌作用系指造山带隆起的山体在板块碰撞产生的支撑力逐渐消失时，在其自重作用下发生垮塌。这一模式很好地解释了许多造山带的后期伸展构造、山前推覆构造以及山根消失现象。

3）大陆地壳的物质组成与洋壳不同，花岗岩为其主要物质组成标志

（1）有关花岗岩的岩浆活动：花岗岩是大陆地壳不同于大洋地壳最重要的物质组成标志。地球化学和其他证据都表明花岗岩通常来源于熔融地壳和地幔物质的混合体。根据已有研究发现至少有以下 3 种构造方式能产生巨量花岗岩：斜向俯冲作用；下冲作用与地壳增厚作用；拆离作用与岩浆底辟作用。

（2）关于花岗岩侵位与构造变形作用方面取得的进展：研究表明花岗岩的侵位主要与走滑作用和伸展作用有关。到达地壳深部的剪切带可以为岩浆上升侵位到较高的地壳层位提供通道。而巨量花岗岩岩浆的侵位可能更主要地与伸展构造有关。

4）地幔流动及垂向作用对大陆具有重大影响

（1）大陆具有独特的物质增生与消减过程，垂直增生也是大陆生长的重要方式。近年来大陆地质研究成果表明，来自地球深部软流圈或上地幔玄武质岩浆和下地壳底部花岗质岩浆的底侵作用也是大陆岩石圈生长的一种方式，称为大陆垂直增生和改造的方式，陆壳侧向水平增生并不是地壳生长的唯一方式。另外，底侵作用也是大陆深部的重要地质作用，具有重要的动力学意义，它不仅使地壳加厚，而且由于底侵过程中带来的热和 CO_2 流体等，

改变了下地壳组成及物性结构，使物质发生迁移，形成伸展崩塌作用，引起下地壳水平拉伸，并使莫霍面变得平坦等。

（2）地幔流动对岩石圈和地壳演化起主导作用。地幔对流、地幔底辟和地幔热柱对岩石圈和地壳底部施加力量，导致岩石圈弯曲和地壳变薄或加厚，并通过岩浆注入的方式进行质量输入。

（3）大陆内部地幔热柱对上部大陆岩石圈，地幔、软流圈对岩石圈，以及壳内流体层对上地壳的影响都很大，大陆内部的“垂向作用”和板块边界的“水平作用”一起构成大陆运动和内部变形的主要驱动力。

5）大陆内部结构具有多层性、层间活动性及非耦合性，原有的刚性岩石圈及其整体运动模式已不适用

大陆岩石圈在垂向结构上有着明显的流变分层性，特别是在中下地壳普遍具有一层或几层软弱层。通常脆性行为出现在中、上地壳以及下地壳和上地幔的镁铁质和超镁铁质岩石中，而韧性行为常发生在5～10 km之下的富石英岩石中。异常的热体制，如上升的地幔柱、逆掩断层造成的地壳双重加厚或来自于地幔的岩浆贯入，都会大大增强地壳的整体韧性。这样不同层次的脆性和韧性行为便构成大陆岩石圈不同于大洋岩石圈的“三层”或“四层”流变学结构。从宏观上看，大陆深部据流变学特点可分以下几层：

（1）上地壳，在地质尺度上表现为刚性；

（2）流体（相对软流圈而言）地壳层；

（3）固态下地壳；

（4）岩石圈的地幔部分。

关于地球内核与其他层圈间的相互作用，除了岩石内部层圈相互作用外，地球内核与其他层圈间的相互作用研究也有新的重大发现。研究结果表明，地球内核和地球一起朝同一方向旋转，但内核的旋转速度要快于地壳和地幔。

关于大陆结构的非耦合性，近年来的研究还发现，在大陆演化的不同阶段，地幔和地壳之间的耦合关系会发生变化，可形成非耦合关系，甚至会形成立交桥式的结构。

6）大陆岩石圈变形的受力是多元的，也是多源的

（1）板块构造理论只注意了板块边界相互作用力对大陆板块边部变形的影响。近年来的研究发现，与大洋相反，大陆板块边界上的变形可以一直延伸到大陆内部，而大陆内部的地盾、克拉通和老的元古宙地块却表现为刚性，构成大陆典型的弥散型变形型式，即典型的盆山系统结构，称为板内变形。

（2）从变形的方式看，大陆内部除了挤压造山作用外，还存在着拆离、伸展和走滑变形相叠加的运动，使大陆板块边界变得很宽，可达2000 km，在大陆边缘和内部古接合带地区，构成了复杂的变形地带。

（3）现已认识到，对大陆变形的总的控制因素是脆/韧性反差和热体制的性质，而壳内软弱层和地幔软流圈的相对影响程度则对大陆变形的型式起着关键作用。在挤压或伸展造山期间，厚地壳、高热流地区往往是通过壳内软弱层来容纳其岩石圈地幔和固态下地壳中的应变，并导致上地壳出现宽阔的弥散性变形，而低热流、地壳相对薄的地区，其岩石圈的应变通常主要由软流圈来容纳。

（4）通过大量原位应力资料系统分析，已获得全球岩石圈上部20～25 km脆性部分的

应力来源特征。岩石圈应力主要来源为：①板内应力场主要受板块边界几何形状的制约；②但活动拉伸的板内地区通常与高地形有关，而与这些地区内地壳变厚和岩石圈变薄有关的浮力应力，则在板内应力场中占主导地位；③叠置的局部应力可引起区域水平方向的旋转。

（5）对全球主要板块的空间大地测量表明，从板内获得的多年资料可与 3～5 Ma 的典型板块运动学模型相吻合，过去几年中板块运动的平均速度与过去数百万年中的平均速率基本相同。但这一速度并不出现在板块边界上，那里的运动以间断性滑移和局部旋转为主。

（6）近年来的研究发现，除板块边界力外，壳幔系统各层圈的相互作用对地幔地壳至地表都有影响，软流圈流动对岩石圈，壳内流体层运动对上地壳变形的影响都是很大的。总之，岩石圈板块的相互作用力解释不了大陆内部变形的多样性和复杂性。显然大陆变形的驱动力是多元的，也是多源的。除板块边界相互作用力外，还有大型板块内部及其底面系统方面的应力，其中有层圈的相互作用，软流圈上涌作用、岩浆贯入、底侵及其浮力，拆沉作用造成的底部牵引力、浮力抬升以及伸展作用；地质流体的动力，地下的相变力以及化学反应动力等都非常重要。

（7）此外，近年来的研究还发现，大陆的变形不仅取决于驱动力系统，而且还取决于大陆对驱动力的响应程度，即大陆变形还受到大陆本身的物质特性、结构以及流变不均一性控制，还与局部的热、密度和地壳厚度的变化，大陆内部的流体地质作用等都有关系。

目前地学界虽然对大陆内部变形的驱动力的认识还有分歧，但已共同认识到大洋岩石圈是由一种作用即洋中脊裂谷作用形成的，而大陆却是由众多作用形成和改造的由各种组分构成的一个大拼合体。这种复杂性是大陆最明显的特征。大洋占地球表面积的 2/3，但它只记录了地球最后 5%的近代历史。而大陆却记录了 40 多亿年来塑造了地球内部和表面的多种作用过程及其相互作用的漫长而又复杂的历史。大陆记录了固体地球的演化动力学。

在第 30 届国际地质大会上，K. Burke 认为大陆是在旋转板块上被动地移动着的，但是板块构造，即刚性物体沿地球表面的旋转，对于组成大陆活动部分的变形而多山的板块边界却并不适用。现今已变为刚性的这些活动部分，是经历了长期演变才呈现目前的构造，当时它们也位于板块的边界带内。因此，大陆动力学着重研究组成大陆造山带的这些古代和现代板块边界带内的岩石和构造。下个世纪大陆动力学研究的重点很可能仍然是活动的造山环境，这是由于它们可能造成地震、火山、洪水和滑坡灾害的缘故。

1.2.6 有关大陆动力学的一些论述

近年来板块构造学说在解决大陆复杂的地质构造问题时遇到了新的挑战，国内外相继提出了很多新的假说与模式，其中影响较大的有美国学者 Meyerhoff 等提出的颤动构造学说（Surge Tectonics）、日本学者 Maruyama 与 Fukao 等提出的地幔柱构造模式（Plume Tectonics）等。另外，一些学者如 E. E. Milanovsky、V. P. Evankin、H. G. Owen、A. Glikson 等还修正与发展了地球膨胀说。近年来我国学者对大陆动力学和地球发展模式也作了一些探讨。邓晋福等以中国为例，以中、新生代为时限，详细论述了“大陆根-柱构造”，指出在全球大陆内，地壳浅部主要表现为 3 种构造形态，即挤压构造带、大陆裂谷带和克拉通。它们分别对应山根与造山岩石圈根、地幔热柱和大陆（岩石圈）根。认为浅部构造形态是对壳幔深部构造的一种响应，所以提出“大陆根-柱构造”，看作它是大陆动力学的“钥匙”。中国大陆同时并存这 3 种构造形态，是全球大陆的一个缩影，因此它的研究将具有全球意义。马宗晋等提出了板条构造学说，指出了全球构造地震系统与地球的非对称

特征，并从八个问题和方面，初步论述了地球变动的综合动力论设想。欧阳自远从全球地球化学分区的角度，提出了地球形成的吸积过程中不同成分的星子群导致的地球初始不均一性。蒋志用“地幔脉动论”来解释地质现象，还将地质时间界限同星际结构的密度波理论联系起来，从地球和太阳系与银河旋臂交会的时间条件，强调了地史上地球自转角速度变化的周期性，从而计算出理论地质年表，以与现有经验年表相验证。此外，钱维宏在其“行星地球动力学引论”中，使用了一些实验和计算方法，提出了古极地大陆及其漂移和“回漂”的设想。杨槐曾提出地球的高密物质起源和“非球对称膨胀论”。还有李鸿业提出了“两极挤压说”，盖保民提出了“相对运动地球动力学”，以及孙泰玉的“地幔圈变形论”，杨学祥等的“科里奥利力驱动构造运动”和一些学者提出的灾变学说等。

1.2.7 我国大陆动力学研究的重点

我国地处印度板块、欧亚板块与太平洋板块的交汇地带，是地球上结构、构造最复杂的地区之一，也是构造活动最活跃、最典型的地区，被誉为世界上研究大陆动力学的最佳场所。近年来，它一直成为国际地球科学界瞩目的地区，也是国际地学界一些重大理论竞争角逐的舞台。一些国家已把我国的一些典型地区（如青藏高原、大别山及苏鲁超高压变质带、南海拉伸盆地、祁连-阿尔金地区、秦岭造山带等）列为全球地质研究关键靶区或重点野外实验室，并频繁召开国际会议。我国有优越的地质条件开展大陆动力学研究，我国地学界将有可能在全球构造研究方面作出贡献，提出有国际影响的新的认识和地学理论。就近期而言，我国大陆动力学研究的重点可概括如下：

(1) 青藏高原隆升机制与深部层圈的相互作用及其对周边的效应。

(2) 青藏高原及邻区大陆碰撞岩石圈增厚过程。

(3) 大别、苏鲁超高压变质带的成因及其折返剥露机制。

(4) 中国东部古生代大陆根的减薄过程及其对地表层圈系统的响应。

(5) 中国大陆不同时期的联合古陆及其裂解过程和相互作用。

(6) 亚洲大陆中、新生代变形动力学过程。

(7) 中、新生代太平洋板块向亚洲大陆俯冲的过程及其地表效应。

(8) 中央造山带盆地系统形成演变过程。

(9) 地学大断面及中国大陆岩石圈三维结构综合模式研究。

1.2.8 大陆科学钻探

大陆科学钻探是岩石圈计划的重要组成部分，也是研究大陆动力学的重要课题，是人类继卫星上天探测宇宙空间之后向地下深部进军的又一划时代的事件。深钻和超深钻的实地探测是最终获得对地壳深部的性质、组成和构造的确切解释的唯一方法。深部钻探与地球物理探测相结合，并与遥感信息相互反馈，使之成为地球科学的大科学设施和望远镜。由于大陆科学钻探不仅可以推动地学前沿领域的突破，而且可以直接为能源和矿产资源寻找、自然灾害减轻和防治、环境和生态保护、重大工程建设服务，必将引起国际社会更大的重视与关注。

目前，世界上已有原苏联、德国和瑞典实施了科学钻探计划，美国、法国、加拿大和日本已制订并开展大陆科学钻探计划。另外，捷克、奥地利、瑞士、英国、比利时等国也进行了相关研究。已在地球历史与气候、撞击构造与群体灭绝、地壳中的流体、矿床成因、火山系统与热体制、汇聚板块边界与碰撞带、地壳地球物理、沉积盆地演化和物理过程、岩

石圈的动力学与变形、陆壳及上地幔成分和性质、深部生物圈、基底区的构造和演化、地震机制以及生态环境等诸方面都获得了大量新认识和新成果。

原苏联科拉半岛超深井 SG-3 孔，是当代世界最深的钻井，井深为 12262 m。在地震剖面推测 7～8 km 的反射层，波速为 6.5 km/s，推断为康拉德不连续面，即花岗岩与玄武岩的分界面，但在钻探中并没有见到。在 6840～12000 m 推测为玄武岩或粒变岩-基性岩层处，却见到了太古宙的花岗片麻岩，否定了以前建立的波罗的地盾东部的深部构造模式。德国的温迪施埃申巴赫井（KTB 孔），井深为 9100 m，研究发现莫霍面下还存在地球磁场，而不是在推测居里温度的地壳深度之下磁场就没有了，同时也发现了热转移和地球物理的不均一性。美国在沿太平洋板块和北美板块的边界至安得烈斯断层上的科学钻探，以前一直认为沿板块边界有较大的磨擦强度，应有较大的热流值，但打了 100 口浅钻，却未发现任何热异常，而测得的最大水平应力方向几乎垂直于该断层的走向，和流行的与断层走向成 30°～40°不符，表明该断层的磨擦强度极低，同岩石力学实验模拟的地震机制恰好相反。

在第 30 届国际地质大会上，大陆科学钻探受到与会者的普遍关注。会议论述内容涵盖了德国 KTB 计划、原苏联深钻探计划、美国大陆钻探计划（CSD）的执行结论及主要科研与技术成果等。日本即将实施超深钻探与地球科学实验计划（JUDGE）。此外还介绍了日本于 1996 年 2 月在葛根田地热区打成一口 500℃超高温地热井的先进经验。

大陆科学钻探的相继实施，表明地球科学已进入一个深入地球深部的新阶段，从而为解决人类未来生存所需的能源、矿产资源、水资源、环境保护与防止和有效预报自然灾害提供了一种新思路和新途径。

我国的科学钻探工程正在起步，需要长远考虑，有近期目标和长期目标。以浅至中深井作为我国大陆科学钻探工程的近期目标，在较短时期内解决一些至关重要的地质、矿产和环境问题，为长期目标做好前期工作，以进一步完成超深科学钻探。我国大陆是解决许多全球性地质和构造问题的关键地区之一，要充分利用我国优越的地质条件，选出具有全球性重大意义的靶区，以引起国际地学界的关注，争取形成国际性的深钻项目，使我国的科学钻探工程在激烈的国际竞争中获得一席之地，在地球深部地壳的研究中作出应有的贡献。目前，我国正在苏鲁地区东海县对高压超高压变质带进行的科学钻探工程已经启动，迈出了可喜的一步，可望取得丰硕的成果。

科学钻探需要多部门、多学科、多工种、高层次人才的密切合作。近年来各国在开展大陆科学钻探计划时的一个新动向，就是积极提倡国际合作，共同投资，共享成果。未来更需要国际广泛合作，需要一项由国际多数专家意见选择的在全球重要地点布孔的国际大陆钻探计划，所选地点应当具有全球意义而不考虑国界的限制。科学钻探计划国际化的逐步实施，必将给地球深部地壳的定量勘查带来质的飞跃。

1.2.9 地学大断面

1）概况

全球地学大断面（GGT）是国际岩石圈计划的重要组成部分，也是研究大陆动力学的重要课题。其研究目的是将一个宽 100 km 的走廊域内的地质、地球物理和地球化学等资料反映到一条断面上，用以表示地壳及其下部的现今状态和可能演化的过程。以地学断面的形式揭示岩石圈三维结构与物质组成、构造活动及其演变过程，阐明构造运动学和动力学机制，反映长期以来大陆增生和裂解，盆地和造山带的成因与演化，从而建立较为合理的

全球构造体制。

全球地学大断面研究始于 80 年代中期，列入规划的地学大断面约 171 条，其分布遍及全球各大洲，大多数断面已经完成。通过地学大断面研究，促进了多学科的交叉和渗透。其中欧洲地学大断面成果最为卓著，14 个国家联合操办，历时 7 年，结合包括深钻在内的多种手段，对岩石圈进行了一次大规模多学科的联合探测，取得了较为丰硕的成果。北美几条大断面有详实的反射地震资料作基础，地壳结构较为清晰，尤其是魁北克-缅因-海湾地学大断面，采用高新技术处理进行综合解释，较有依据地推断出该区的地壳结构和成生过程，并试图重塑早期阿巴拉契亚造山带演化细节。亚洲地区以孟加拉湾-喜马拉雅-青藏高原-蒙古戈壁-西伯利亚和班加罗尔（印度）-塔什干（塔吉克）两条纵贯南北的地学大断面最为引人注目，它们包容了最宽的时间跨度，穿越了复杂的构造单元，是研究岩石圈内部结构构造、物质组成、高原隆升、造山带的形成与演化、大陆动力学机制的重要剖面。日本在西太平洋大陆边缘布置了 5 条地学大断面，用来研究现代活动大陆边缘的俯冲和增生作用。此外，在南美洲、大洋洲和非洲也有若干地学大断面，但大多只有地质和重磁资料。

2）地学大断面研究进展现状

（1）在地体和大陆的演变方面

80 年代以来，对古构造背景和古地理环境研究，从而进行古板块再造，曾是国际地学界研究的重要内容之一，全球地学断面对这方面进行了更为深入系统的研究，各断面流程图中均划分了不同性质的地体，通过这些地体的漂移、俯冲、碰撞、拼合、固结的过程，进一步了解大陆的形成与演化。认识到太古宙与元古宙的构造形式具有明显的不同。推断认为古生代期间不存在大规模板块活动，而中生代则出现像联合古陆解体那样的大规模的板块运动。大陆裂开成陆内裂谷或小洋盆，地壳减薄，当拉张停止转为挤压，壳源物质充填和幔源物质贯入，以及地幔底侵作用导致地壳加厚，使增生的大陆块体形成更为复杂的变质和变形构造。

（2）在碰撞造山带研究方面

以往的研究表明，碰撞造山带既可为弧-弧、弧-陆，也可为陆-陆碰撞的产物。其组合形式可分为简单型和复合型。构造变形和地球化学活动对了解碰撞作用过程至关重要。研究显示在同一地区和同一时间内，构造形式往往是多种多样的。挤压、伸展、走滑变形常同时并存，在主应力的作用下，不同方向上和不同的部位，可产生不同性质的分应力，相应地会出现不同的构造形迹。对造山带内的挤压作用形成的推覆和褶皱构造，一直被视为碰撞的重要标志，但对走滑和伸展作用的重要性，只是近十几年来才被人们重视。

通过亚东-格尔木-额济纳旗地学大断面的研究，对青藏高原碰撞造山带有了更深入的了解，认为它是由不同时期和不同地区的弧-陆、陆-陆碰撞造成的复合造山带。从该断面内碰撞造山带的构造变形、盆地性质、岩浆活动、热变质事件以及深部地球物理特征所作的主构造应力分析得知，碰撞造山带成生过程从挤压作用开始，转为挤压与伸展两种作用并列，最终以伸展作用结束。欧洲地学大断面探讨了碰撞造山带的地球动力学模型，推断早先俯冲残留岩石圈根与较新的下插不太深的根组成了复杂的岩石圈结构，正是阿尔卑斯碰撞造山带岩石圈下部与周边岩石圈根的差异，造成向下的力，出现幔内俯冲，其上方则派生出横向剪切挤压应力，使下地壳破碎并与上地幔呈叠瓦状，地壳与岩石圈整体加厚，排开较高密度的上地幔，上地壳内除形成推覆构造外，派生的上浮力还诱发其上升和伸展。无

论是青藏高原还是阿尔卑斯造山带，都显示了它的主要动力来自其下的地幔。

(3) 在伸展作用和裂谷活动方面

美国加利福尼亚-亚利桑那地学大断面充分揭示了盆地的特征。可解释为在张应力作用下地壳破裂，形成以高角度正断层为边界，并呈雁行排列或零星分布的地堑-半地堑，其规模、沉降幅度、岩相变化和岩浆活动均与断层的生长活动密切相关。沉积物以快速堆积粗碎屑为主，其后并有早期岩浆活动。在持续的拉张作用下，形成起伏相间的垒-堑构造，在断层引起重力下滑的同时，还产生了侧向伸展，导致在浅部地壳内出现拆离面，伴随发育张性剪切以及其后的岩浆活动。由于地幔物质上涌，不断传送热能，岩浆对流与传导呈现出不均一的热状态，反映出拉伸作用的不均一性。隆起的上地幔形态复杂，顶面呈波状凹凸起伏，断隆对应着幔坳，断坳对应着幔隆，地幔隆起的幅度与热流量似呈明显的对应关系，表明热作用不仅控制了地幔隆起，也控制了盆地的断陷深度和沉积厚度，而且是造成地壳减薄的主要因素。

(4) 在下地壳与莫霍面研究方面

反射地震揭示，陆壳的结构存在多种形式，在横向上或纵向上都是不均一的，总体上由一些逆冲岩片或双重构造形态的岩片构成，经历了多期挤压和伸展的交替变化，这些岩片以不同的方式相互叠置，显示出多个内部低速带和众多层状形态。不同构造背景的下地壳和莫霍面结构其反射特征是不同的。在稳定的克拉通地区，莫霍面相对较为稳定，在构造活动区，莫霍面要复杂得多，常呈现出不稳定的动态变化，而且往往是年轻的新生构造。

10 年来的大规模全球地学断面的多学科综合研究，在克拉通、大陆边缘、裂谷带、造山带的构造演化，地壳结构、物质组成以及物理化学状态等诸多方面获得了丰富的资料，对岩石圈的总体面貌有了较客观的认识，对大陆的生长机制和成因有了较深入的了解。但由于断面控制的范围有限，深部资料相对贫乏，从地学大断面的研究成果而言，大多还是建立在原有理论和认识水平之上，只有区域性的或局部意义，尚不能概括出全球岩石圈的总体特征与大陆动力学的演化模式。

3) 我国的地学大断面

我国已完成穿过不同构造类型的地学大断面共 13 条。在地学大断面的编制和研究中，运用了地质学、地球物理学、地球化学和大地测量学等多学科综合研究手段，对地体的演变、大陆的裂解和拼合、古地理的重建、古板块再造、岩石圈的结构构造、物质组分以及壳幔结构等进行了较深入的研究，取得了较丰富的成果。研究结果表明，中国大陆不均一性十分明显，呈现纵向分层、横向分块现象。其中亚东-格尔木大断面获得国际上高度好评，被岩石圈委员会作为样板并推荐进行了特展。尽管我国完成的地学大断面遍及全国数量较多，但尚未能提出中国岩石圈的三维结构综合模式，是今后亟待解决的问题。

展望未来，新开展的准噶尔-天山-塔里木地学大断面对开发新疆、发展我国中西部经济有重大作用，可用以促进新疆寻找油气、矿产资源及减轻地震灾害和改善环保工作；中国地学大断面在球面上编制出篱笆墙，从立体上进行对比研究，是一项很有特色的研究工作，此项研究在刘光鼎院士领导下进行，即将完成；各地学大断面都对所穿越的地区做了若干重大、关键地质构造问题的探讨，利用这些资料，编出我国大陆及邻近海域岩石圈的基本格架已初具条件，并已开始工作，有望在近年内提出我国岩石圈模式的新成果。

1.2.10 大陆动力学研究展望

由于人类生存和社会经济持续发展的需要，地球科学要以保证资源、保护环境和减少灾害为主要目标，要不断扩大研究领域，创新研究方法，以建立新的全球系统地球科学体系。了解整个地球系统的过去、现在和未来的行为及其演化过程，仍是今后地球科学的基本任务。研究领域正向“上天、入地、下海、登极”挺进，研究的重点科学问题正从“演化”向“过程”演变，研究的范围正由局部、地域向全球方向发展。近年来研究各种时空尺度过程的地球系统科学得到迅速发展，一系列关键技术不断出现（如可移动式地震台网、反射地震、层析成像、电磁感应、高精度大地测量：甚长基线干涉测量（VLBI）、卫星激光测量（SLR）、全球卫星定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）、高分辨率化学和同位素分析、科学钻探、热流和应力测量，以及计算机模拟等等），大陆动力学研究步入了新时代。在 21 世纪，大陆动力学必将会有非凡的发现和惊人的进展。

1.3 造山带

1.3.1 引言

全球构造带的研究重心已转向造山带，主要是通过造山带的形成与演化历史和动力学过程来揭示构造带的特征和发育过程。

通常认为，造山带是地壳挤压收缩的变形带，是挤压性构造运动造成的。这种造成构造山脉的作用称为造山作用或造山运动。造山运动是在地球深部构造动力学背景下所发生的岩石圈剧烈构造变动和其物质与结构的重新组建的复杂地质过程，造成地壳或岩石圈横向收缩、垂向增厚，隆升成山。近年来的研究证实，不仅是挤压褶皱断裂可以成山，而且扩张拉伸、剪切走滑、火山活动同样可以造山，故可把造山带广泛理解为呈狭长隆起的，由造山作用所形成的地壳或岩石圈变形构造带。造山作用是一个复杂而漫长的过程，形成的造山带更是经历了长期而复杂的地质演化过程。

近 20 年来，关于造山带的研究已脱离其传统的，作为一个封闭区域地质单元的研究体系，而置身于全球地质研究体系当中。对造山带的板块裂开、大洋扩张、板块俯冲和碰撞过程的恢复，以及在此基础上进行的全球古板块演化历史的再造，已成为这一时期造山带研究的主要内容。而对造山带结构构造形成的物理学机制及其形成过程的探索正在成为近 10 年来造山带研究越来越重要的内容。近年来在造山带深部结构构造方面获得了许多新的信息和资料，使我们增进了对造山带复杂性的了解，同时还获得了造山带壳-幔物质运移和再循环等方面的新证据。这些有关造山带深部地质和地球化学的大量新资料，引起了人们对造山带认识上的新飞跃。由于造山带是研究岩石圈地质作用过程的最重要的天然实验室，因而造山带的结构、过程和动力学就成为当代地球科学重大前沿领域之一，也是探索地球奥秘，研究大陆地球动力学的基础和关键领域之一。

1.3.2 造山带研究的若干前沿问题

当前和今后造山带研究是以大陆动力学为主导思想，从以往阐明板块运动历史和板块边界相互作用为主要内容转向以阐明造山带岩石圈及其下地幔系统中各层圈相互作用过程和动力学的新阶段。

当代造山带研究正围绕着下列前沿问题展开工作：

（1）碰撞后的造山过程——拆沉作用、伸展垮塌和深变质岩剥露；
（2）造山带之下的地幔结构和演化；
（3）壳内软层的性质和动力作用；
（4）造山带地壳的精细构造和演化；
（5）巨量花岗岩的成因和侵位动力学；
（6）沉积作用与造山过程：根据沉积过程对造山过程、造山事件的恢复再造；
（7）新元古代超大陆再造-聚合、增生与裂解对造山作用过程的控制作用。

1.3.3 造山带研究进展现状

1）提出了造山带新的分类方案

过去简单的运动学分类不足以说明造山带的复杂性，新的造山带分类把岩石圈的变形作用和板块运动结合起来，深入细致地刻画了造山带的动力学特征，从成因上建立了造山带类型。如Colal Sengor进行了系统全面的造山带分类，他按照汇聚作用过程把造山带分成四大种类，20个类型。

2）古板块的俯冲和碰撞作用过程细节与古大陆边缘变形作用研究

现已了解到相对板块运动的方向和速率明显控制着汇聚板块边界带中的变形行为；不同规模和性质的块体之间的碰撞造成不同构造样式和变形强度的造山带；通常块体之间的对接并不是边界平直、同时拼合到一起的。斜向汇聚作用实际上是块体对接的普遍形式，它往往导致相邻块体之间的相对旋转，形成发散性的冲断作用和走滑作用的构造产物；在碰撞造山带中，从内部变质核带向外部褶皱冲断层带的变形迁移要持续几千万年；从构造上来看，造山带由发生过位移的碎块组成。这些以断层为边界的块体可视为两种基本类型：一类是没有被俯冲下去的地质体，如岛弧、微大陆、大型增生杂岩，它们通常碰撞增生到大陆核部，构成原始的造山组分；在这种增生过程中及之后，原始的造山组分被分别或一起切成推覆体、走滑双重构造、拉伸移置体，形成第二类的造山杂乱组分。

3）造山带的地壳增厚和剥露过程研究

造山带的地壳增厚和剥露过程是造山带地壳形成的主要构造物理过程。早期板块构造理论认为，这一过程是通过前陆盆地的褶皱-冲断，蛇绿岩片的仰冲而增厚，之后通过侵蚀作用使岩石剥露地表造成今天的造山带地貌。然而，近年来的研究表明，造山带的增厚过程可以在板块汇聚作用期间由刚性大陆板块俯冲作用和上部板块的板下作用来完成，而在地壳增厚同时或之后，伸展作用则造成深部岩石剥露出地表。

在挤压造山期间，沿着被动大陆边缘发生的刚性大陆板块的俯冲作用，造成大多数岩石向下运移形成根部而不是向上运移形成高地形。只是在挤压停止、去掉了对上浮根部的支撑后，随之而来的伸展作用才引起造山带的抬升。

上部板块以仰冲作用为主的地壳缩短作用，仍是地壳增厚的一个主要因素，并且在时间上可能早于俯冲作用。

高压变质岩出露在许多造山带的地表。近年来研究表明，这些岩石曾处于几十公里至几百公里的深处，并与周围岩石关系之间缺乏连续的中间地壳剖面，呈构造接触。现认为这些岩石是造山带伸展过程中板下作用和抬升作用所引起的剥离作用造成的。

造山带的增厚和剥离过程记录在变质岩的p-T-t轨迹中。同一造山带中不同变质岩块的p-T-t轨迹可以是不同的，反映了其不同的埋藏和剥离历史。综合考虑这些块体的轨迹，

可以揭示造山带的增厚机制和剥离机制。

4）造山带演化中不同变形作用的表现和相互关系

造山带中除挤压作用形成的逆冲推覆构造为主要构造外，还有走滑作用和伸展作用造成的变形构造。近几年来增强了对走滑作用和伸展作用在造山带形成过程中重要意义的认识。

走滑作用不仅贯穿造山带演化的各个阶段，而且还造成某些走滑型的造山带。走滑作用常常和挤压作用联合造成扭压型造山带，其特征是由横推断层和冲断层带共同构成的中地壳尺度的滑脱体系。在走滑构造样式研究的基础上研究了花状构造和走滑双重体、拉分盆地。近年来又进一步提出了挤出构造和构造逃逸的概念，丰富和发展了造山带构造研究。

伸展作用同样贯穿在整个造山带的演化过程中。伸展分离有 3 种型式：纯剪切、单剪切和拆离型式。拆离又细分为 5 种类型：岩石圈楔、分层剥离、剥离＋纯剪切（包括大侧向分离和小侧向分离两种）以及分层剥离＋下地壳纯剪切类型。其分离的规模可以拉出洋壳，也可以不拉出洋壳，因此早期伸展作用对造山带后来的演化影响很大。在汇聚作用期间，在局部地区一直发育平行于汇聚带的上部地壳弯曲拉伸带。由于地壳增厚所需的均衡补偿高程引起的体力和俯冲带后退产生的体力，都可驱动岩石圈的伸展作用，造成平行或垂直于造山带的伸展构造。犁式断层、剥离断层、变质核杂岩和岩浆核杂岩等概念的提出，进一步丰富和发展了伸展构造的研究。特别是变质核杂岩的结构构造、形成过程及动力学机制研究的成果，更能反映伸展构造的研究现状与进展。

5）造山带的深部结构

近期研究已揭示出造山带的深部结构，其整体上往往呈双向俯冲构造扇型式及其变种，而造山带内部的地壳和壳下岩石圈呈复杂的凹槽与指状交织的形式。通常上部地壳发育有大型滑脱构造，中部显示出双重构造和鳄鱼构造，而下部地壳中有的有强烈倾斜的地震反射，有的为平坦的地震反射；莫霍面有的起伏有山根，有的较为平坦无山根。

6）造山带岩石圈的流变学结构和动力学意义

造山带岩石圈流变学的性质是探讨造山带动力学的基础。近 10 年来大陆岩石圈的流变分层和下地壳的流变学颇为引人瞩目。

不同构造单元的流变分层是不一样的，它主要取决于其岩石圈的深部物质组成分层和热结构以及流体特性。对造山带地区得出的 2 个最典型的流变学分层剖面为：

（1）"三明治"结构，韧性的下地壳夹在脆性的上地壳和最上部地幔之间；

（2）"四层"结构，两个韧性带（一个为 20～30 km，另一个为 40～60 km）分割开两个脆性地壳层和一个地幔脆性层。

下地壳的流变学近年来之所以备受人们注意，主要是因为它强烈地影响着许多一级地壳构造的性质和演化。造山带的许多动力学过程与之相关，如：

（1）镁铁质和超镁铁质岩浆的板下作用和地幔底辟作用；

（2）重熔作用；

（3）与增厚作用或减薄作用有关的构造应变。

这些作用通过改变热流和地温梯度、压力-温度轨迹及局部地球化学环境等而影响下地壳的流变学。

7）造山带的壳-幔循环

从造山作用过程来看，在俯冲阶段存在着强烈的壳-幔物质的交换现象，其结果记录在造山带中。碰撞作用导致造山带岩石圈发生强烈的壳-幔交换作用和壳内再循环。上地幔剥离作用和均衡调整作用加剧了壳-幔边界的玄武岩板下作用和麻粒岩相变质作用。逆冲作用和俯冲作用使地表岩石和流体插入地下，重熔成花岗岩浆再侵入上来。这一系列作用都引起造山带组成元素分异和运移及再循环。这一阶段的壳-幔再循环是造山带壳-幔循环研究的主要内容和特色。此外，在某些地壳剖面中发现有些下地壳比上地壳年轻，表明存在重要的玄武岩板下作用事件。

8）造山过程中变质作用的演化

近年来造山带变质作用研究的重点从俯冲阶段的变质作用转向碰撞阶段增厚-剥露过程中的变质作用演化史。

造山带的变形作用、抬升和剥离对变质岩的分布有重要的影响。这些变质岩的分布可以指示变质岩的抬升和剥离过程。

不同阶段造山作用，其变质作用表现型式不一样。从总体来看，从俯冲到抬升，其变质温度从高到低。

1.3.4 我国大陆造山带研究进展

近年来，我国大陆造山带研究已进入了“板块动力学”研究的阶段，主要包括了古板块体制的重塑，陆内“收缩”、“伸展”、“平移”作用及其伴随的变质-岩浆事件的全过程，以及岩石圈结构的地学大断面所揭示的三方面内容。秦岭造山带、北祁连造山带、横断山造山带及青藏高原是碰撞造山的典型；燕山造山带是板内造山的典型。

1）秦岭造山带

研究认为，秦岭造山带是由北秦岭造山带和南秦岭造山带拼合而成的复合型造山带。北秦岭造山带是以出现大推覆构造和发育有两条与之平行的高压榴辉岩变质带为特征的古生代造山带；南秦岭造山带是印支期造山带，以盖层、基底间深层、多层次滑脱构造为特点，其间自南而北发育着近于对称的3～4条中—低温、高—超高压变质带。秦岭造山带经历了后期的构造叠加与改造，特别是中新生代以来的构造性质已由原来的挤压碰撞转向了以垂向隆升为特点的构造运动，并伴有大量花岗岩侵入。对此，建立了秦岭复合型造山带的造山模式，即前寒武纪板块俯冲碰撞造山、古生代断裂造山、中生代滑覆-推覆造山而形成了统一的秦岭造山带，尔后又经历了晚白垩世以来的断块造山，整个造山过程都是在岩石圈内部完成的。研究还发现秦岭造山带岩石圈结构具有明显的流变分层性和“立交桥”式的宏观构造型式，即深部的下地壳和岩石圈地幔以下具有与中国现今大区域地球物理场一致的近南北向异常特征，而上部则以近东西向结构构造为特征，表明深部的下地壳和地幔具有更大的塑性流变特征，而中上地壳强度较大，更多保留了主造山期的构造残迹。

2）北祁连造山带

北祁连造山带研究得知，阿拉善地块与祁连地块之间的走廊南山带为一条加里东古俯冲杂岩带，包括了多重火山增生弧、高压变质带、弧前增生楔、滑脱糜棱岩带和蛇绿岩残片，其俯冲变质演化经历了低压变质→高压变质→低压退变质的俯冲-折返过程。此外，在北祁连两侧发育着形成于晚古生代的两条平行山链方向的韧性右行平移剪切带，切割了加里东褶皱带。这些都证实了北祁连造山带中存在古俯冲型、平移型和滑脱型韧性剪切带等三种类型，进而确立了北祁连造山带古俯冲型韧性剪切带的“海沟倒退俯冲动力学”成因

模式。

3）横断山造山带

横断山造山带也是复合型造山带，但有别于秦岭复合型造山带，区别在于它是经历了俯冲造山、碰撞造山、走滑造山相互叠加而成的复合型造山带。

4）青藏高原与喜马拉雅造山带

青藏高原隆升机制的研究是大陆造山带研究的主要内容之一。亚东-格尔木断面成果显示喜马拉雅造山带具有多层结构的特征，同时也揭示了青藏高原是一个拼合的大陆。以安多-丁青断裂为界，高原可分为南、北两大部分，地壳结构各异。研究还指出喜马拉雅造山带不仅是世界上最年轻的造山带，而且是具俯冲和叠置的新型造山带。在第 30 届国际地质大会上，肖序常等根据地质和地球物理等资料提出，青藏高原的隆升机制是多因素、多阶段和多层次的不均匀隆升。高原地壳缩短、加厚和隆升受到三大力源控制：一是来自南面印度板块的挤压及四周的塔里木、扬子以及中朝地台的滞后阻力，产生向高原内不均匀的汇聚挤压和导致高原内各块体位移速率的差异，以及在空间上出现不同类型、层次的构造变形，是控制高原地壳缩短、加厚和隆升的基本因素；二是高原内的热力作用、热效应，它们不仅能增强地壳的蠕动变形，造成地壳的缩短、加厚，而且促使地壳发生重熔、热扩散，从而产生低密度空间，为地壳上浮、隆升提供有利条件；最后是均衡调整对高原隆升的控制作用。显然由于高原地壳-岩石圈结构的不均匀性、热扩散存在差异等原因，高原隆升在时间和空间上是不均匀的，是受各种因素约束的。但对高原隆升尚有不同看法，法国地学家如 P. Tapponnier 仍强调在高原隆升中，走滑断层起主导作用；而 B. C. Burchfiel 和曾融生等认为高原地壳加厚、缩短和隆升，主要是下地壳的韧、塑性物质向东流出，致使高原深部为韧、塑性和“虚弱”层，易于缩短和加厚；K. D. Nelson 等则强调高原熔融层、流体对地壳缩短、加厚和隆升起重要作用。

在青藏高原隆升机制的研究中，还获得以下进展：

（1）西藏及邻区特提斯构造域可划分为晚古生代—三叠纪古特提斯、晚三叠世—始新世末新特提斯和渐新世以来陆内汇聚与变形三个构造演化阶段；

（2）南、北两大陆对接后，该区经历了白垩纪末—始新世的陆-陆碰撞、渐新世—中新世高原雏形的形成和上新世以来高原快速隆升的陆内变形三个阶段，在最后的快速隆升阶段，隆升速度越来越快。与此同时，有更确切的资料证明晚古生代—早中生代时期青藏高原不存在特提斯大洋，而是具洋盆和海湾间古陆并存的构造格局。研究还表明，目前印度板块仍在继续向北运动挤压高原，高原现仍在上升中。

5）燕山造山带

具有板内造山特征的造山带，主要分布在我国东部，以燕山造山带为其典型。近期研究表明，燕山造山带是在前寒武纪克拉通基础上形成的陆内型造山带，属大陆造山带的一个类型。该造山带的演化可分为：中生代以前的漫长地史时期的稳定克拉通构造演化阶段的前造山期、三叠—白垩纪期间多期伸展→收缩构造演化阶段的主造山期和新生代断块→隆升构造演化阶段的重造山期。火山活动与岩浆侵入是中生代燕山陆内造山作用的重要组成部分。因此，中生代岩浆底辟作用、伸展、火山喷发、断陷盆地形成、岩浆侵位引起的隆升及其收缩所引起的多期次构造变形、叠加与改造等，是燕山造山带的重要造山机制。目前所见的燕山造山带，是新生代时期以伸展构造为主，地壳表层表现为断块运动，形成盆-

山的差异性升降的产物。

目前，我国正在结合 1∶25 万区域地质调查，对西部不同类型造山带——东准噶尔造山带、北山造山带、东昆仑造山带、秦岭-昆仑结合部造山带、松潘-甘孜造山带以及三江造山带的基本特征及其构造演化等进行研究，已取得一批新成果。

1.3.5 造山带研究展望

造山带研究是地球科学的组成部分，是当前大陆动力学前沿研究领域，在迈向 21 世纪的进程中，随着研究层次与涉及学科跨度增大，高新科技的飞跃发展，全球构造及造山带研究将进入一个崭新的时期，能为新世纪人口、资源、环境、经济持续发展作出新贡献。

我国是造山带最多、类型最全的国家，选取典型造山带进行深入研究，可望在大陆动力学理论研究方面获得重大进展，进入当代地球科学研究队伍的先进行列，并作出应有的贡献。

主要参考文献

王仁．1996．关于地球动力学．见：《21 世纪初科学发展趋势》课题组编写．21 世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社，179～181．

王振纲．1996．我国大陆造山带研究进展．见：中国地质矿产信息研究院编著．走向 21 世纪的地学与矿产资源．北京：地质出版社，114～116．

王鸿祯．1995．全球构造研究的简要回顾．地学前缘，第 2 卷第 1～2 期，37～42．

邓晋福，赵海玲，莫宣学等．1996．中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙．北京：地质出版社．

李晓波．1993．造山带的结构、过程和动力学．见：肖庆辉等编著．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，26～38．

李晓波．1995．大陆动力学．见：《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组编．走向二十一世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社，108～115．

孙鸿烈，程国栋，李吉均等．1995．青藏高原形成、演化、环境变迁与持续发展．见：《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组编．走向二十一世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社，354～369．

吴汉珍．1996．大陆动力学研究的若干趋势．地质力学学报，第 2 卷第 3 期，1～2．

吴功建．1997．中国地学断面地球物理研究的进展和展望．地球物理学报，第 40 卷增刊，110～118．

吴功建．1998．岩石圈研究的重要问题与研究方向．地学前缘，第 5 卷第 1～2 期，99～107．

《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组编．1995．走向二十一世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社，17～46．

肖庆辉．1993．大陆岩石圈的结构与动力学．见：肖庆辉等编著．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，7～16．

肖庆辉．1995．大陆科学钻探．见：《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组编．走向二十一世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社，334～345．

肖庆辉．1995．全球动力学与大陆动力学．见：《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组编．走向二十一世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社，65～73．

肖庆辉，白星碧．1996．简单的板块构造与复杂的大陆．见：中国地质矿产信息研究院编著．走向 21 世纪的地学与矿产资源．北京：地质出版社，94～97．

肖庆辉，李晓波，贾跃明等．1995．当代造山带研究中值得重视的若干前沿问题．地学前缘，第 2 卷第 1～2 期，43～48．

肖庆辉，贾跃明，刘树臣等．1994．推进我国地质科学前沿研究的谋划．北京：地质出版社．

宋晓东．1998．地球内核与地球深部动力学．地学前缘，第 5 卷增刊，1～7．

陈毓川，张之一，项礼文等．1997．90 年代地球科学的动向——第 30 届国际地质大会学术报导．北京：地质出版社．

林海，马福臣．1999．地球科学部资助项目研究进展．见：国家自然科学基金委员会编．中国科学基金，172～174．

项仁杰，史兼周，冯昭贤等．1991．地壳和上地幔研究．北京：地震出版社．

赵文津，黄立言，熊嘉育．1997．喜马拉雅和青藏高原深剖面研究的进展．地球物理学报，第40卷增刊，143～149．

黄怀曾，吴功建，朱英等．1994．岩石圈动力学研究．北京：地质出版社．

张国伟，周鼎武，于在平．1993．大陆造山带成因研究．见：肖庆辉等编著．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，145～154．

张炳熹，洪大卫，吴宣志．1997．岩石圈研究的现代方法．北京：原子能出版社．

曾庆存，张焘，叶笃正等．1996．地球科学．见：《21世纪初科学发展趋势》课题组编写．21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社，72～83．

滕吉文．1995．地球深部圈层结构与动力学．见：《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组编．走向二十一世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社，205～209．

Bucher W. 1993. The Deformation of the Earth's Crust. Princeton: Princeton Univ. Press, 518.

Condie K C. 1982. Plate tectonics and crustal evolution. Pergamon Press.

Howell D G. 1989. Tectonics of suspect Terranes. London: Chapman and Hall, 232.

Kumazawa M, Maruyama S. 1994. Whole earth tectonics. J. Geol. Soc. Japan, 100 (1): 82～102.

Maruyama S. 1994. Plume tectonics. J. Geol. Soc. Japan, 100 (1): 24～49.

Meyerhoff A A, Taner I, Morris A E L, et al.. 1992. Surge tectonics, a new hypothesis of earth dynamics. In: Chattergee S and N Hotton Ⅱ eds.. New Concepts in Global Tectonics. Lubbock: Texas Tech. Univ. Press, 450.

National Research Council (NRC). 1993. Solid-Earth Sciences and Society. Nation. Acad. Press. Washington, D. C.

Owen H G. 1992. Has the earth inccreased in size? In: Chattergee S and N Hotton Ⅱ eds. New Concepts in Global Tectonics. Lubbock: Texas Tech. Univ. Press, 450.

Ringwood A E. 1989. Constitution and evolution of the mantal. Geol. Soc. Australia. Sp. Pub. No. 14, 457～485.

Salisbury M H. 1990. Exposed Cross-Sections of the Continental Crust.

Sengor A M C. 1990. Plate tectonics and orogenic research after 25 years——a Tethyan perspective. Earth Sci. Rev., 27: 1～201.

第2章 能源与固体矿产地质

2.1 成矿作用理论研究热点

人类生存和社会经济发展对地球科学的要求不断提高，地球科学各学科将与其他自然科学和社会科学一起，共同解决社会生存和发展所提出的一系列科学和社会问题。地球科学今后的主要任务之一就是要为人类提供充足的资源，例如能源、矿产和水等。

矿床学是地质学最重要的应用学科之一。虽然它在发达国家中的地位正在下降，但在发展中国家它仍保持稳定发展的势头。成矿理论和探矿技术、方法研究是矿产资源评价预测的基础。近年来，西方国家由于其地质工作的重心转向环境，对成矿理论方法的重视程度远不如以前，这也导致在国际地学界中有关成矿理论的前沿性研究不十分突出。中国对矿产资源的需求越来越大，目前已在油气、铜、铁、钾盐等大宗矿产资源上出现紧缺局面。因此，研究新的成矿理论和方法是中国地质学家义不容辞的责任。

当代地球科学的重大前沿研究领域之一是成矿作用与成矿地球动力学的研究。在过去10年中，成矿理论的研究已进入成矿地球动力学阶段。板块构造理论、大陆构造新概念、化学动力学新理论的引入以及洋底热液成矿作用、生物成矿作用、深部成矿作用等新领域的开拓，给成矿学带来勃勃生机。立足于不同尺度的动力学分析，探讨成矿的时空演化过程和成矿作用，将成为新的成矿理论的生长点，也是新一代普查找矿方法的基础。

2.1.1 构造与成矿

1）全球构造与成矿

由于找矿评价和成矿预测的需要，全球构造与成矿逐渐成为当今地球科学的研究热点。人们首先发现很多金属矿床产于活动大陆边缘。在这种构造环境中消减带的存在、钙碱性岩浆的发育和强烈热流体的作用形成了一系列金属矿床。板块构造学说的兴起，使早期的大陆漂移观点得以复活和发展，并导致了全球构造新见解，现代矿床学出现了把矿床形成作用放在全球构造和地史演化的背景上研究的趋势，从而把成矿作用与板块构造机理密切结合起来进行研究，开始以板块构造理论来分析不同类型金属矿床产出的大地构造背景。例如产于灰岩（含膏盐层）的铅锌矿床形成于被动大陆边缘；与花岗岩有关的铜、钼等金属硫化物矿床形成于火山岩浆弧等等。在矿化作用和板块构造关系的研究方面，特别具有重要意义的是板块边缘的成矿作用，例如大陆边缘安第斯型斑岩铜矿、大西洋型塞浦路斯式块状硫化物铜矿床、块状菱铁矿矿床，岛弧型火山-沉积含铜黄铁矿矿床、黑矿型块状硫化物矿床和火山喷气-沉积型层状硫化物矿床等，认为上述矿床大多与板块构造的俯冲消亡带有关。现代板块内部某些区域性金属成矿带可能与古板块构造边缘活动带有关，但对古板块构造和成矿作用关系的研究尚较薄弱，大陆内成矿用板块构造理论亦难以简单解释，争论也较多。尽管如此，板块学说对区域成矿规律和矿床成因等问题的研究仍具得要的影响。

板块构造理论虽然能够解释显生宙某些金属矿床的分布规律，但是难以应用到太古宙和元古宙。为了弥补板块构造理论的不足，近年由 Gurnis 和 Murphy 等人提出了超大陆旋回，并发现超大陆旋回与金属成矿巨旋回之间具有惊人的一致性。由于超大陆离合涉及到深部构造热活动、大陆岩石圈上拱作用、地幔物质楔入作用、地幔部分熔融作用、地壳伸展作用和碰撞作用，因而与成矿的关系十分密切。大量资料表明，特定金属矿床的成矿期与超大陆的离合期一致。例如内陆盆地非造山岩浆矿床（如奥林匹克坝型矿床）集中发生在超大陆解体的初期和超大陆聚合的末期，造山型矿床（如斑岩铜矿、脉状金矿）在超大陆聚合期最发育。由于超大陆旋回是由板块构造理论发展而来的，只能对大陆边界金属矿床的时空分布规律作出宏观的解释，仍不能阐明大陆内部和特定成矿阶段的成矿规律和成矿机制。此外，俄罗斯学者研究成矿大地构造背景提出了成矿构造的地球动力学分类。美国学者通过卫星遥感技术和计算机技术研究了美国中部金属成矿区的深部构造特征和大地构造背景。总体来说，对于金属矿床大地构造背景的研究，是一个有待进一步探索的重大前沿课题，随着全球动力学和大陆动力学研究的全面展开和向纵深发展，将会取得重大突破。

2）深部地质构造与成矿

研究深部地壳结构对于了解内生金属成矿作用的深部条件、深化区域成矿规律研究和进行矿产深部预测具有重要意义。

以往认为，金属矿床只形成于地壳上部的 2～3 km 深处。但俄罗斯科拉半岛超深钻不但在 1665～1830 m 的深度见到了铜镍矿化，而且在 6.6～9.5 km 深处也发现了低温热液型 Cu、Pb、Zn、Ni、Ag 矿化。在俄罗斯克里沃罗克铁矿田已由深钻证实了在 2700～3000 m 深处分布有富铁矿石的预测。80 年代中期在莫斯科召开了全苏内生成矿作用深部条件的专业会议，专门讨论内生成矿作用与地壳深部构造之间的关系以及内生金属矿化的深部预测等问题。美国在科罗拉多州克里德矿区进行深达 3～5 km 的科学钻探，其主要目标包括探测：①推测以隐伏侵入体及可能与之伴生的斑岩型矿化的深部热源；②古热液系统的地热、化学及水文地质演化，并与现代地热环境相对比；③矿化作用与容矿酸性火山岩破火山口之间的时间、构造及岩石学关系。深部构造研究还表明，矿床、矿田和成矿带的分布除受浅部地质构造控制外还受地壳厚度和成分、上地幔的起伏等因素控制。俄罗斯已利用深部地质成果编制了莫霍面深度与成矿省相关关系图，并在许多地区开展了深部构造与成矿预测的研究。美国也已开展了利用地壳厚度、布格重力数据、上地幔波速等资料解释地壳中金属成矿省的分布规律方面的研究。

2.1.2 成矿省演化与成矿

1）研究现状

金属成矿省的概念自 20 世纪 20 年代提出以来，已经历许多修正和补充。早在 50 年代，世界上很多学者，如 Smirnov、Hutchinson 等即已开始重视地质历史演化与成矿问题并发表了大量论著。特别是在第 26 届国际地质大会提出“金属集中区”，1989 年在第 28 届国际地质大会上将地质历史演化与成矿作用列为专题讨论，一些国际知名矿床学家对“成矿省演化”、“成矿作用发生-发展-继承-转化轮回”、“锡矿床的地质历史演化”、“前寒武纪矿床在地质历史中矿化型式趋向”等问题作了论述，为从全球地质论述矿床形成的时、空分布规律提供了理论基础。1992 年第 29 届国际地质大会设置了“金属成矿省演化讨论会”，会上

除对隐生宙到显生宙的不同地域、不同时期金属成矿省演化作了深入论述外，还就“金属成矿省类型”作了探讨，为金属成矿省在大范围内进行类比及矿产的寻找与预测提出了新思路，例如近年俄罗斯与南非学者合作对比了西伯利亚地台周缘活动带和南非凯普瓦尔（Kaapwaal）克拉通南缘活动带，结果发现此两带虽然远隔万里，但从克拉通向其边缘，自老至新都出现了极为相似的由基性-超基性到花岗岩类和碱性岩的岩浆建造及其成矿演化规律，从而相互补充了找矿方向，扩大了成矿远景。第30届国际地质大会又将“地质历史中成矿省演化”列为专题讨论会之一。金属成矿省研究的指导思想从以往仅在一定地质构造单元内以其一定成矿特征（矿种或矿床类型）标定一个成矿省及其规律的做法，发展为随地质历史推移探讨在开放体系中壳-幔相互作用和成矿作用非平衡态的动态成矿过程，并研究它在一定“成矿构造场”内出现相对平衡态时而形成的金属成矿省的活动论新概念。在大会专题讨论中以中国华北陆台北缘及其北侧成矿带的研究为实例，提出金属成矿省已由过去在大地构造背景上圈定不同类型矿床来划分成矿区带的静态方法，发展为从地质历史演化分析入手，深化研究（背）“景”、（成矿）“场”、（成矿）“相”和（矿）“床”4个成矿等级体制耦合性规律的动态方法。提出了“时间维”造成“空间维”，或者说“金属成矿省演化”是一切成矿因素的“函数”的新思维。这是对近百年的金属成矿省传统概念的新发展。第30届国际地质大会还提出了一些重要的认识，如对保存完整的非洲古陆块特殊成矿性演化提出了新的看法：认为滨西北太平洋成矿带和两类与花岗岩有关的矿床的成矿时代是由侏罗纪到现代，成矿演化发生在陆缘环境，主要是夕卡岩型-斑岩型-石英脉型矿床，在岛弧环境主要是黑矿型矿床；分析了古亚洲天山造山带构造成矿动力特征和成矿史。不少国家和地区，如蒙古、芬兰、中国、俄罗斯等，根据各地区的成矿条件提出了不同的成矿演化特征。以俄罗斯学者为主提出了前寒武纪断代的动力环境的排序与成矿问题；认为单独的超大型岩浆型铜-镍硫化物矿床是与大量岩浆流有关的局部硫化物富集作用造成的，这类矿床的时空演化应以硫化物从早期到晚期和局部空间的富集为主。中国自80年代初开展了成矿远景区划工作，制定了成矿区带划分原则与工作方法，同时对一些成矿区带如南岭、长江中下游、华北地台北缘、三江（金沙江、澜沧江、怒江）和秦巴地区开展了重点研究，其研究程度可与阿尔卑斯、阿巴拉契亚和科迪勒拉等世界知名成矿区（带）相媲美。这些研究成果都在不同程度上涉及成矿省演化。

2）研究内容

Bateman 提出成矿省是一个矿化相对丰富的地区，并有一种矿床类型相对占有优势。Petrascheck（1965）认为一个成矿省的矿床至少在矿物组成、类型、样式和成矿时代上有关系。金属成矿省的最主要内涵是不同金属成矿“组成”（component）和不同“组成”在其中的分布与结构。大多数学者认为，每一个“组成”实际上是成矿作用在开放系统非平衡态演化中产生了相对平衡态，构成了最有利成矿的时空域的产物。例如中国有色金属之乡的南岭成矿区发生了6次较大范围的成矿作用，这6次振荡成矿作用也就是6次相对平衡态构成的最有利成矿的时空域的反映。因此，研究成矿作用中平衡态形成环境和时空分布是科学地认识金属成矿省内部演化的重要内容。裴荣富等（1994a）认为，控制金属成矿作用平衡态产生的成矿省的内部结构及其演化通常是按不同级次发展的。第一级次是控制重大地质事件和热事件产生的成矿地质构造背景（tectonic setting），简称“景”。第二级次是由地质的、构造的、岩石的、地球物理和地球化学的综合控矿因素有利组合而形成的

“成矿构造场”(metallotect convergence)，如板块会聚带是大量矿床产出与分布的场所，当其发生异常有利组合时，可形成“异常成矿构造场”(exceptional metallotect convergence)，它将是特大型矿床发生成矿偏在性（metallogenic preferentiality）的重要原因。此级简称之为“场”。第三级次是由矿物共生（mineral paragenenis）和矿物共生组合（mineral association）达到一定的物、化条件相对平衡时而构成的金属成矿相，此级简称之为“相”。第四级次是矿床，它是金属成矿省中成矿作用演化的最后体现，此级简称之为“床”。上述“景、场、相、床”4个等级体制（ranking system）的建立将反映金属成矿省内涵的层次、排序和演变过程的相互关系，使金属成矿省划分与研究在演化的基础上又赋予成矿地质的动态系统控制内容。这4个等级体制形成的完善程度及其相互间关系将以它们之间叠置出现的程度即耦合梯度(coupling gradient)来衡量，并作为评价或预测成矿远景区的依据。通常若其耦合梯度较陡，即4个等级体制密切叠置，则可能出现大矿；反之，则仅出现中、小型矿床。

成矿省的研究是以成矿年代的确定为其重要基础，成矿年代学是认识金属成矿省演化的计时钟。它除了结合矿床特征进行科学取样和矿物学与测试方法研究外，更重要的是研究矿床的成因和成矿作用的演化规律。近年来，随着测试技术方法（如矿物流体包裹体的同位素年代测定、Re-Os 法测定年代技术等）和矿床地质（如矿物互边结构关系确定和矿物共生组合序次的研究等）研究的深入使成矿年代学研究有了很大的发展，并对矿床认识有了新的评定（裴荣富等，1994a）。

3）展望与研究方向

金属成矿省的地质历史演化是成矿学中的老问题，但近百年来又有了新发展，关键的问题不是过去的从成矿的“空间”上看“时间”，而是“时间”的演化造就了“空间”成矿，即没有“时间的推移”，就没有现在的成矿“空间”。概念的不同对深化认识和评价超大型矿床具有十分重大的意义。

金属成矿省（区带）的演化，在克拉通、造山带、大陆边缘带和一个国家（地区），以及地质历史的断代和一个矿床本身，都具有随时间迁移而演化的历史；脱离成矿史分析是很难正确地认识成矿区带的成矿作用以及进行对比和评价的。从第30届国际地质大会提交的大量研究实例可见，金属成矿省的地质历史演化是今后成矿学研究的重要发展方向。

金属成矿省应重点研究下列内容：①成矿构造背景，主要从地质历史演化研究不同时期区域构造的交汇样式、相互作用强度和彼此影响的范围，探讨构造演化的动力机制，提出有利“成矿构造场形成的背景和条件”；②“成矿构造场”，主要研究“成矿构造场”中综合控矿因素的有利组合和汇聚机制，尤其是突出研究其中“金属成矿相”的形成、分布与结构，阐明它形成的最有利时空域；③成矿地质事件，重点研究事件过程和跨区域或跨壳层传递的不连续性，为判断事件的存在及其性质提供依据；④成矿年代，主要对有代表性矿床，在其矿物共生序次定性研究基础上，进行各种方法的测年，同时还要依据地质体相互关系作为成矿年代确定的佐据，建立金属成矿省区域成矿计时钟（metallogenic time table)；⑤选择有代表性的成矿省进行立典研究，编制不同比例尺的金属成矿省的四维成矿分带图；依据成矿与构造的统一性和地质历史演化中动态成矿新概念，编制新的四维成矿分带图，并在此基础上进行新一轮成矿远景区预测。这种成矿预测新思维是对地质勘查工作的重大贡献。

2.1.3 超大型矿床寻找和探索理论研究

超大型矿床由于其巨大的经济意义，使近 20 年来，受到国际矿床学界的普遍重视，超大型矿床的形成背景和成矿作用过程及其预测研究成为矿产资源研究的重要方向。

超大型矿床的定义尚不够一致，加拿大 Laznika (1989) 提出巨大 (Giant) 型矿床为金属的异常地球化学聚集，其吨位聚集指数为矿床的经济金属吨位与地壳中金属平均含量 (10^{-6}) 的比值大于 10^{11}，而超巨型 (Supergiant) 矿床该指数大于 10^{12}。涂光炽 (1994) 将超过我国储量手册中的大型矿床储量 5 倍以上的矿床称为超大型矿床。对若干有色金属与贵金属 (如 Cu、Pb、Zn、Au、Ag) 来说与 Laznika 的巨型矿床大致吻合，即二者储量落在同一个数量级范围，但对黑色金属与若干稀有金属来说二者储量相差很大，可达几个数量级的差别。

1) 超大型矿床赋存特征及分类

超大型矿床矿化类型具明显的选择性，对某一金属和非金属而言并非所有矿床类型都可以形成具超大型规模的矿床，这是一个涉及超大型矿床找矿方向及成矿理论的问题。一般情况下，某一矿种的矿化类型中有一二个或二三个类型可形成超大型矿床，其出现的机率是不同的，例如中国钼矿虽有多种具工业价值的钼矿类型，但只有斑岩型形成超大型矿床；锡矿则是锡石硫化物类型可形成超大型矿床；汞矿 (如中国务川) 层控矿床常赋存于碳酸盐岩中。铅锌矿为层控型，世界级铅锌矿床均产于沉积岩中的 SEDEX 和 MVT 类型为主。金矿带有较强的区域性色彩，如中国大陆是中生代热液型金矿，台湾是陆相火山岩型金矿，加拿大是太古代形成之花岗岩-绿岩带型金矿；南非几乎是清一色的古砾岩金矿；在前苏联有穆龙套、宗毫巴等浅变质含碳碎屑岩型金矿；在西伯利亚东部，至少有两个 (达拉松、巴列依) 火山岩-次火山岩型金矿具超大型规模；美国的超大型金矿则主要是硅铁建造 (BIF) 型的赫姆斯塔克 (Homestake) 金矿及卡林型金矿。戴自希 (1996) 统计了全球 14 种金属 108 个最大矿床 (区) 的矿床类型。更进一步说明了全球超大型矿床对其矿化类型是有选择的。例如，世界铁矿石储量在 10×10^{8}t 以上的超大型铁矿床有 18 个，其中 11 个为沉积变质型，占总数的 61%，占其储量数的 84%。但储量在 100×10^{8}t 以上的只有 7 个，全部属沉积变质型。铜金属储量超过 1000×10^{4}t 的巨大铜矿至少有 22 个，其中 12 个是斑岩型，占总数的 54%，占总储量的 61%；6 个为砂页岩型，占总数的 27%和其储量的 24%；其它类型铜矿只有 4 个，占总数的 18%和其储量的 15%。铅锌储量在 1000×10^{4}t 以上矿床初步统计有 21 个，其中 9 个为喷气沉积 (SEDEX) 型，占总数的 43%和其储量的 47%；4 个为密西西比 (MVT) 型，占总数和总储量各 19%。铝土矿储量超过 10×10^{8}t 的巨大矿床初步统计有 8 个，全部是新生代的红土型矿床。银储量大于 2×10^{4}t 的巨大矿床约有 8 个，全部为中、新生代的火山、次火山岩型矿床。说明各类巨大矿床矿化类型偏在性十分明显，这也为我们寻找各类超大型矿床指明了方向。

涂光炽 (1994) 在 Laznick 1989 年提出二分法分类的基础上，将超大型矿床划分为点式分布、面式分布和过渡式分布 3 类：第一类几乎是在世界上"独一无二"的，即同一类矿床在大面积内、甚至在世界范围内，均尚未发现第二个，如白云鄂博、奥林匹克坝等矿床。第二类超大型矿床是有"子孙"的，即同一类型矿床的大、中、小型矿床分布较广，如中国玉龙铜矿和中国凡口密西西比型铅锌矿。第三类过渡类型确有一批超大型矿床存在，如广西大厂和云南个旧的锡矿床。而且在大厂锡石硫化物矿床中锑也形成了十分罕见而独特

的超大型矿床。柿竹园钨锡矿床和金顶铅锌矿床亦可归入此类。超大型矿床的分类问题尚有待深入探讨，不管是二分、三分或多分法都宜抓住超大型矿床之间，它们与大中小型矿床之间的共性和特性，这样才有利于寻找新的超大型矿床和提高成矿理论水平。

2）超大型矿床全球背景研究

为深入了解超大型矿床的形成机制与分布规律，应当立足于全球总的地质背景进行研究。戴自希（1996）在综合了全球108个矿床资料后提出了超大型矿床在全球的共性。这种共同规律性往往是中、小型矿床不具备的。其主要共性如下：

（1）时控特征：全球超大型矿床往往局限于地质历史的某一时期，其时控特征很明显，如超巨型铁矿多形成于新太古代—中元古代，铁矿石储量超过100×10^8t的7个矿床全部出现在这一时期，绝大多数斑岩铜矿集中在晚白垩—老第三纪以及古生代。砂页岩型铜矿则主要出现在元古宙和二叠纪两段地史时期，前者包括赞比亚-扎伊尔铜矿带、俄罗斯乌多坎铜矿带、美国贝尔特铜矿带以及亚洲最大的铜矿——阿富汗艾纳克铜矿，后者有波兰卢宾铜矿以及德国曼斯费尔德铜矿等；SEDEX型铅锌矿床在全世界范围内集中在古元古代—中元古代和早古生代—中古生代，产在元古宙的矿床有西伯利亚的Hologin和Gorebek、澳大利亚布罗肯希尔（Broken Hill）、麦克阿瑟河（Mc Arthur River）芒特艾萨（Mt Isa）、“世纪”、加拿大沙利文（Sullivan）和南非甘斯堡（Gamsburg）等，产在古生代的有中国厂坝、德国Meggen和Rammelsberg、美国“红狗”、加拿大塞尔温盆地的霍华兹山口等矿床。这种超大型热水沉积型矿床虽为数不多，但其中具超大型规模者占很大比例，在世界各大洲均有分布，其空间相距颇远而形成时代却很近似，且都是储量上的庞然大物。MVT铅锌矿多集中在古生代，像美国密苏里州的维伯纳姆矿带和老铅矿带等，此类型虽常成群出现，超大型矿床却少见。红土型铝土矿全部出现在第三纪—第四纪。不整合脉型铀矿出现在古中元古代，如加拿大的阿萨巴斯卡（Athabaska）盆地和澳大利亚（中）北部阿利格特地区的一些巨大铀矿床等，这类矿床不仅储量大，而且品位高，为其它类型铀矿所不及。这两个地区中，在不大的面积内分布若干个不同类型超大型铀矿，可称之为超大型矿“密集区”。类似的“密集区”也见诸卡林型金矿。美国60年代后在内华达州、中国80年代后在扬子克拉通的西南缘和西北缘发现了各有约40个卡林型金矿密集区，其中若干具大型-超大型规模，其共同性很值得注意。首先它们都发育以元古宇浅变质岩系为主的基底，含矿岩系是未变质的细碎屑岩-碳酸盐岩-硅质岩建造。特别是其中的浊积岩和碳酸盐岩及相变处，在卡林型金矿密集区除金矿外，常可出现其它的低温矿床组合，如汞、锑、雄黄、雌黄、冰洲石、铅锌等。矿石的特征元素组合是Au-Hg-Sb-As-Tl-Ba。原生矿石中的金主要呈准微米级的自然金出现。卡林型金矿形成时代很新，在美国西部主要是新生代，而在中国西部则为晚中生代。上述两密集区的许多相同之处导致了卡林型金矿在全球分布的一定局限性。从全球角度看，上述各类矿床中的多数在产出地层的时代上具明显的一致性，即有时控特征。

（2）多元素综合成矿特征-多期多次成矿作用：许多大型矿床常具有独特的矿物组合特征、同位素和伴生元素等。超大型矿床中的多元素不仅以伴生元素形式出现，且各自均能达到巨大矿床的规模，如美国犹他州宾厄姆矿床铜、金、银、铅锌储量均很大；加拿大基德克里克矿床，铜、铅锌、金和银的储量也都很大；澳大利亚奥林匹克坝矿床更是富集了大量铜、铀、金、铁和稀土；中国内蒙古的白云鄂博矿床富集了大量铌、铁和稀土金属；同

样，中国湖南柿竹园矿床中的钨、锡、钼、铋均构成巨大的矿床。这些都说明形成巨大矿床往往在同一地点有多次成矿作用的叠加，作用的时间也较长，由于叠加和富化作用造成大而富的矿床，如美国克莱梅克斯斑岩钼矿和乌兹别克斯坦的穆龙套金矿，就是在这种多期侵入成矿和长期叠加富化条件下形成的。

(3) 构造因素对巨大型矿床形成具有重要意义：构造因素对巨大型矿床形成至关重要，大型矿床多产于构造活动较为复杂的地段，这些地段往往是成矿作用长期多次出现、矿化程度较高、矿质来源不同和形成时间不连续的矿化在空间上共存的场所。大型线性构造、裂谷、同生断层、破火山口等与矿床的关系尤为密切，如美国西南部诸州主要的斑岩铜矿区位于几个重要构造单元的交汇地段；澳大利亚奥林匹克坝矿床产在NWW向与NNW向区域重力线性体的交汇处，矿化出现在以NW向断裂为界的地堑中，在这一地壳薄弱地带发生一系列张性断裂；中非巨大的砂页岩型铜矿与两次裂谷作用有关，沉积在NW向的裂谷带内；澳大利亚布罗肯希尔巨大的铅锌矿床受中元古代裂谷或地堑控制；许多巨大的绿岩带金矿与韧性剪切带有关；加拿大赫姆洛金矿紧靠苏必利尔湖剪切带，矿化产在剪切带内变形作用最强烈的中部；破火山口和火山角砾岩筒控制了许多巨大金、银矿和铜矿，如美国的克里普尔克里克等3个最大的火山岩型金矿和智利的埃尔特尼恩特属世界第二大斑岩铜矿即产在角砾岩筒中。

形成巨型矿床往往不是单一因素，最常见的是时代-地层(包括火成岩)-构造组合控矿。如太古宙-绿岩带-剪切带（绿岩带金矿）、元古宙-火山沉积变质岩带-裂谷（元古宙砂页岩型铜矿）、元古宙-碎屑沉积地层-同生断层（SEDEX型铅锌矿）、元古宙-大型沉积盆地-不整合面（不整合型铀矿）、中、新生代或古生代中酸性岩浆岩-大型断裂交汇造成的高渗透带（斑岩铜矿）和中、新生代-陆相火山岩-破火山口（浅成热液金银矿）等等。这对超大型矿床的勘查具有重要意义。

3) 展望

在国内外需求和理论发展推动下，超大型矿床形成环境和分布规律的研究已成为地球科学的前沿领域，一些国际学术组织和一些发达国家已将超大型矿床的研究列为重点项目，以求加深对超大型矿床成矿条件的认识，逐步建立起能指导超大型矿床勘查的理论基础。例如1987年国际地球物理与大地测量联合会（IUGG）提出90年代地球科学12个重大课题之一为“超大型矿床全球背景环境”，1994年在加拿大召开了超大型矿床讨论会。1992年中国国家科委批准了“与寻找超大型矿床有关基础研究”项目列入国家攀登计划A中，取得较好效果。涂光炽（1996）提出超大型矿床的寻求和探索理论研究的内容、方法及条件为：①对我国已知近60个各种金属及非金属超大型矿床进行深入剖析，着重解决其形成机制，提出其规律性认识，探索找矿方向；②在某些大、中型矿产密集区探索超大型矿床前景；③我国若干重要含矿岩系超大型矿床前景剖析，如在与俄、蒙、哈、吉等相邻国相似的含炭岩系和陆相火山岩系中研究寻找超大型Au、U、Cu、Ag等矿床；④一些地质作用（如同生构造、热水沉积作用、有机质演化等）与超大型矿床形成关系的研究；⑤对特殊成矿条件与超大型矿床形成关系的研究，这是需要填补的空白领域，如超大型金矿产出于高寒冻土带，世界上5个超大型Cu-Ni硫化物矿床中，围岩硫的参与在其中三个矿床起重要作用；⑥矿床类型的开拓，如研究较晚的金矿、独立银矿、独立铂族矿床等其新类型矿床开拓的潜力甚大，一些老矿种，如金刚石，也有可能发现新类型矿床，其中可能蕴育超大

型矿床；⑦探索锗、铊、硒、碲等分散元素形成独立矿床，甚至超大型矿床的条件；在高技术领域中十分重要的分散元素矿床可以说是21世纪矿产新领域，应当重视研究对这些有利的成矿条件；⑧应重视超大型矿床保存条件的研究；⑨与其他学科结合进行隐伏超大型矿床的综合地球物理和地球化学探测新技术、新方法及对取得数据、资料合理解释的研究；⑩超大型矿床的全球背景研究，从全球角度进行综合剖析对比研究将对在世界范围内寻找超大型矿床及提高成矿理论水平大有裨益。

2.1.4 大规模成矿作用与大型成矿密集区

1）研究意义

过去30年中，成矿学研究主要沿着两条主线发展，其一是建立以板块构造理论为基础的构造环境与特定矿床类型之间的联系，发展成矿带的地球动力学与成矿作用理论；其二是建立和改进各类矿床的形成模式和找矿模式。其研究都取得了重要的进展，但在实际找矿应用中效果还不够理想。关键问题在于缺乏把大尺度的岩石圈作用同小尺度的矿床形成有机联系起来的纽带。因此，90年代以来中外成矿学界开始把目光集中到比成矿区带更小，比大型超大型矿更大的大型成矿密集区（简称矿集区），以其为主要对象融汇和发展大陆动力学与成矿、区域成矿演化、超大型矿床及全信息综合找矿模型等国际矿床界和矿业界所关注的前沿研究。可以预计，从地球壳-幔系统的成矿元素巨量聚集过程研究入手，预测与寻找大型矿集区和巨矿，将成为21世纪初成矿理论与找矿方法研究的主流。

超大型矿床研究还存在一些问题，如白云鄂博和奥林匹克坝等都是惟一的成点式分布，找不到第二个相同或相似矿床。此外，不少超大型矿床不是独立存在，而是大型矿集区中的一员，说明了大矿和中小型矿可能具有统一的形成机制。只有置于大背景或大环境研究成矿作用和成矿过程，才能准确地认识成矿规律。从非线性角度出发认识大规模成矿和大型矿集区，有可能建立逼近实际的成矿和找矿模型。显而易见，着眼于大尺度（成矿省与大规模成矿作用），切入中尺度（矿集区）是当前成矿学和矿产勘查学研究的国际大走向。研究大规模成矿的目的就是为了了解其成矿过程和成矿规律，从而有效地指导找矿勘查。

2）研究内容

大规模成矿作用研究是超大型矿床研究的一种延伸或展开，不仅研究成矿区带中的超大型矿床，还研究相关的其他矿床，探讨矿床形成过程、时空分布规律和不同规模矿床之间的内在联系。大规模成矿作用是一种重大事件，它与区域地质-地球物理-地球化学环境密切相关。因此，大规模成矿作用研究的基点是成矿地球动力学，探讨层圈之间，尤其是壳幔之间相互作用的形式、过程和结果以及制约其发生的动力学机制。国际研究动态表明，从地幔和陆壳深部去寻找成矿作用的根源已成为关键的科学问题之一，什么样的动力学机制和过程会诱发金属的巨量富集？邓晋福等（1999）提出岩石圈/软流圈系统的大灾变（Catastrophe）与成矿大爆发（Explosion）、岩石圈尺度三维不连续（Discontinuities）与大尺度成矿带的储矿空间以及岩浆-流体-成矿系统与成矿作用的源-运-储统一的时空关系等问题从理论上阐述了矿集区形成机理。

毛景文等（1999）提出大规模成矿作用实质是成矿物质的巨量供给、传输和聚集过程。这种作用不可能在成矿区带或成矿省中均匀发生，有超巨量成矿物质聚集地段，就有更大面积的贫化或不发生变化的地段。因此，在一个成矿省中，大规模成矿主要表现在几个或十几个大型矿集区。这些占全省面积不到5%～15%的矿集区一般拥有全区成矿金属量的

80%～95%。无论是巨矿还是矿集区的形成，都必须有巨量的物质补给，能量的持续供给和优越的物质传输系统以及罕见的卸载和储存环境。大规模成矿作用的重要因素有：①成矿作用的一般规律是在不同地质历史演化阶段和不同构造环境中产出不同的矿产组合，而大规模成矿作用发生不拘泥于一般规律，它则是对应着一些特别事件，往往表现为突发事件，是地质历史演化中在某些特殊环境下的产物，故大规模成矿亦称爆发式成矿；②大规模成矿必须有巨量物质供给，地球上元素分布有明显的不均一性，无论是地幔还是地壳或者两者均巨量富集某种成矿元素，才有可能大规模成矿；③大规模成矿不仅有巨大物质供给，而且还必须有巨大能量供给，大规模成矿作用与大规模热事件密切相关，如毛景文等（1995）和 Plimer（1995）曾经提出高热（HHP）含矿花岗岩分别为中国柿竹园和澳大利亚 Mole 矿床成矿的重要条件；季克俭等在 1989 年提出岩体仅仅是热液矿床形成的能源，它与围岩构成的矿源和大气降水作为水源成为成矿的三大要素，并由此创立了三源成矿学说，在 30 届国际地质大会上有这方面内容丰富的专题讨论会；澳大利亚开展的 GEMC 项目，即"大陆地球化学演化与成矿"研究，并实施大陆四维地球动力学模拟计划，提出了构造圈热侵蚀（tectosphere thermal erosion）和壳幔互化新概念，邓晋福等（1999）也正在对这方面进行深入的研究；近 10 年来，地幔柱（Plume）构造研究已经逐渐成为大陆构造研究的热点，可解决大陆上板块构造难以解释的壳幔垂直运动机制，并认为，热点和地幔柱是地球内部能量的一种最重要形式；④流体在成矿过程中扮演着十分重要的角色。它既是能量传递的媒体，也是成矿物质输送和交换的重要介质。流体的形成、运移、演变和沉积基本上反映了整个成矿轨迹。现代研究表明，地球中流体几乎无处不在，马东升（1998）指出地壳大规模流体活动深度可达 20 km，现代盆地研究还发现流体常大规模运动，其范围可达几百至上千公里，并发现大陆上古流体大尺度运移，且与区域成矿密切相关。现代海底和湖底成矿作用清楚地显示了流体与成矿的关系。进入 90 年代以来，越来越多的研究证明海底成矿系统之下部有岩浆房的存在，它不仅是成矿的能源，而且岩浆流体不同程度参与了成矿过程。大陆边缘是流体最活跃的地区，地幔研究的进展说明不少矿床的成矿作用与地幔流体有着密切的关系，例如四川大水沟独立碲矿床，白云鄂博超大型稀土矿床和湖南万古金矿等均属地幔流体成矿。邓晋福等（1999）认为岩浆-流体-成矿系统是实现成矿作用的源-运-储统一的系统。

3）研究趋势

成矿区（带）的地质历史演化作为区域成矿规律研究的重要问题，已得到国内外矿床界共同关注。在 30 届国际地质大会的专题讨论会上与会学者都把此问题作为今后矿床学研究的重要发展方向，认为脱离成矿史分析很难正确地认识成矿区、带的成矿作用以及进行正确的对比和评价。

矿集区已成为区域成矿规律研究的集中点，90 年代以来中外矿床学界都把目光集中到成矿区带内范围更小的矿集区。在矿集区内，有大、中、小矿以至超大型矿。它们之间关系密切，在时空上有一定分布规律，构成不同尺度的成矿系统。矿集区有其形成的规律。在成矿区、带中找矿集区，深入研究现有矿集区，再预测并寻找新的矿集区，不但具有理论意义，而且具有重要的战略找矿意义。无疑，矿集区是现代矿床学研究的科学前沿，这方面研究的趋势是探讨：①矿集区形成的区域地质背景；②矿集区与壳幔作用的关系；③矿集区内各种矿床之间的关系；④矿集区形成的巨大物质供应源以及运移和沉淀过程；⑤快

速确定矿集区的新技术和新方法；⑥矿集区精细结构分析和大比例尺矿床定位等。

2.1.5 地球内部流体与成矿

1）流体地质研究

包括气、液及熔体相在内的流体是地球深部最为活跃的组分，它参与地球深部几乎所有各种作用过程，诸如地壳中的岩浆作用、变质作用、成矿作用、构造作用、地幔蠕变、乃至软流圈的形成和运动。流体不仅存在于整个地壳层位，而且在地幔中也有大量呈结合状态的挥发性组分，如OH、H、N、卤素、S、He、烃类、CO和其它稀有气体，通过岩浆或火山活动和地幔排气作用，被带到地壳或者进入大气圈、水圈或生物圈，这些流体无疑是地球内部及其表面最为活跃的因素。流体在深部的运动携带了约一半的内部能，它不仅决定了壳-幔系统中物质和能量的搬运，而且直接影响和控制着地壳乃至地幔的化学演化、物理作用和动力学过程，从而对地球内部结构、地质过程、反应动力学和壳-幔相互作用起着明显的控制作用。流体又是能够把地球内部的各种地质作用相互联系起来从整体上进行研究和认识的关键。

地球内部流体不仅对油气生成和成矿作用具有十分重要的主导效应，而且还充当了矿床、油气形成、地震和滑坡等灾害诱发、有害废物污染以及地球环境变化等最重要的媒介和作用剂。在地壳范围内的各种高、中、低温热液矿床及接触交代矿床，其有用组分的溶解、搬运和沉淀是在流体状态下实现的，即使被认为是像铬铁矿、硫化物铜镍矿、钒钛磁铁矿、金刚石等典型的岩浆矿床也已证明是在有S、P、F、Cl及H_2O、CO_2等挥发成分参与下而成矿的。

大洋中脊和弧后扩张带普遍存在的深海热液作用是全球化学平衡中十分关键且了解甚少的环节。海底扩张中心“黑烟囱”“白烟囱”等正在进行的成矿作用和热液系统中含金属卤水的发现，及观察到的过程可用来解释有关类型矿床，并将导致某些成矿理论的重大修正。中国白云鄂博稀土铁矿床和新疆尉犁超大型蛭石（金云母）矿床也已证明为富CO_2流体的地幔流体交代矿床（刘若新，1996）。

多年来流体地质研究说明：①流体对金属和烃类的搬运在几乎所有矿床和油气藏的形成中都起到了必不可少的作用，例如北美大陆热卤水大规模活动运移控制了北美地区特大型密西西比型（MTV型）铅锌矿床、其它层控金属矿床（Cu、Au、U-V）等和大部分油气藏的形成和分布。②成矿金属的运移与油气运移机理大体相同，很多金属矿床和油气藏在时间和空间上都有密切的成生联系。③俄德大陆超深钻惊奇地发现，在结晶岩8～12 km深度下仍有明显的（次生）孔隙度和大量高度渗透性的自由孔隙流体。这些流体除部分来源于深部外，主要是下渗循环的大气降水或地表流体。流体中成矿金属元素含量很高，甚至还有微生物活动迹象，说明这里正在发生着强烈的流体（-生物）-成矿作用，并意味着地表流体对深部作用的显著影响。上述发现不仅大大深化了人们对地球内部及表面流体和作用过程的理解，而且为重新认识和阐明矿床和油气藏的形成与分布提供了崭新思路，推动成矿理论研究真正进入到探索地壳规模控制因素的新阶段，而且势必还会影响到未来金属矿产和油气勘查战略与方向。可见，大力加强流体地质研究，从理论上讲可从一个新角度重新认识各种地质现象和作用过程，检验、修正和发展地球科学理论；从实践上看，则可以为地球科学处理和解决与资源环境灾害等有关的实际问题的全新的知识和方法手段，从而使流体地球学成为当前主要发展的前沿课题之一。地球深部流体地质学研究重点有5个

方面：①地球内部流体与成矿作用；②地球内部流体（主要是气体）与环境、灾害及全球变化；③地球内部流体的实验研究（流体-岩石相互作用，流体参与下岩石的物理、力学性质）；④地球内部流体动力学研究；⑤地球内部流体的探测。现仅就第一方面作为矿床找矿规律研究的主题进一步进行阐述。

2）地球内部流体与成矿作用

地球内部流体研究与过去以固体物质研究为基础的地球科学认识形成了鲜明的对比，正在有力地打破许多传统观念和思维的局限。因此，加强流体地质科学研究，并建立起以探讨和认识地球内部流体作用和演化及其与成岩、成矿关系为基础的新一代地球科学知识体系，已成为当今地球科学发展的一个重大前沿课题。地球深部流体是多种成矿作用中的关键因素，也是寻找新类型矿产资源和获得新的成矿理论和找矿思想的生长点。这项研究具重大理论和实践意义，国际上已将其列为最优先研究的领域，世界各国先后计划设置了一系列重大课题，如美国和加拿大还将其成矿作用的重点转向了地球内部流体成矿系统，并将地质流体系统及对金属矿床和油气藏形成与分布的控制作用列为地球内部流体研究的主要发展方向之一。

近年来通过深部钻探、地球物理测量、同位素测试以及通过地幔来源包体以及地震火山等现象的观测取得的重要发现和认识说明，不仅需要从地球动力学更高层次继续深入研究和探讨流体的来源、性质、组成、作用过程和演化等，而且它们对传统的油气地质、矿床地质、地震地质乃至生物学研究等都提出了严重挑战，要求人们重新认识油气矿床、地震的成因以及水圈和生物圈的下限和构成。为此，近年来对这些问题的探讨提出了一些新的概念或假说（贾跃明，1994）[1]。①油气非生物成因理论。传统的观念（绝大多数人）认为世界上的天然气资源源自沉积岩层中有机质的分解。但是另一种赞成无机成因的论据在100多年前即已提出来了。这些年来，有人认为行星生长过程中地球捕获了大量原始甲烷，后来这种气体运移到地壳内，并聚集在沉积岩储层中，说明地球上的石油和天然气（或许还有煤）主要是由蕴藏于地幔中的烃类随排气作用而生成的，而生物在油气藏的形成中可能只起到次要作用，并认为即使在人类可能开发的地壳深部（如15 km范围内）蕴藏的天然气也远远多于已发现的油气储量，可供人类利用数千年，具重大的经济意义。对陨石中烃类的研究、地幔源烃类的发现和研究以及瑞典深钻和乌克兰前寒武纪基底（3100～4100 km）工业油气田等重大发现激发人们寻找深部油气资源的热情，如原苏联、瑞典、加拿大和美国等均在作这方面的尝试。②油气内生成因说。该假说认为地壳深部气藏主要属俯冲成因，即随着沉积物在俯冲带下沉，有机质被熟化改造成烃类，然后因构造作用烃类随流体上升、聚积形成。③深部高温生物圈假说。在俄罗斯科拉半岛、瑞典和德国的一些深钻中发现微生物活动迹象，近来在美国阿拉斯加深部（>3 km）油气层中也发现了大量微生物活动，可见伴随地下深部流体圈的存在，在高温（至少110～150℃）、高压环境下，可能存在一个自成系统的高温生物圈，主要是不依赖太阳光和地表能，而靠深部流体化学能生活的厌氧菌（微生物）组成。这些生物活动可能对地壳深部流体成矿作用起着重要的作用。④地壳规模的运移对油气和金属矿床形成与分布的控制作用。油气：以往一直认为在饱和

---

[1] 贾跃明．1994．流体地质研究的主要进展和未来发展方向．见：形势与挑战——供编制“九五”计划二〇一〇年规划参考（上册）．北京：中国地质矿产信息研究院．255～264．

带之下的岩层中流体很少或几乎没有。80年代北美大陆的综合研究说明，流体即活动的热卤水在该大陆地壳深部的沉积盖层中曾发生过大规模运移，其运移距离达数百乃至上千公里，运移速率可达0.1 m/a数量级，源于地表的流体（大气降雨）大规模循环在结晶岩中可达到10～15 km或更深层位。这个进展为重新认识和深入探讨油气形成、分布和圈闭提供了全新的思路。很多证据表明流体决定了油气的二次运移，世界上几乎所有最大型的油气田形成和分布都受地壳流体大规模远距离运移的控制，它们离开其生油源岩通常达数十至数百公里。如美国伊利诺斯油气盆地产油区的油气主要来源于100多公里之外含大量残余沥青的新奥尔巴尼页岩；加拿大艾伯塔超大型油田，美国怀俄明西部含磷建造中之石油都类似。油气生成与流体运移关系的新概念改变了油气生-储-盖的传统概念。美国为实现新一轮油气找矿突破提出了寻找深部热流体房的新方向，以巨资进行有关理论和方法的研究。**金属矿床**：深入研究流体活动对金属矿床成因研究提供了新的途径。应用大规模流体运移成矿的新模式，能够说明典型的中、低温热液和层控型矿床的一些问题。地壳规模的流体运移控制了许多大型—特大型矿床，尤其是MVT型（密西西比河谷型）矿床和层控金属矿床的形成和分布，如“红层”型Cu-Pb-Zn矿床、砂岩容矿的Cu-Pb-Zn-Fe硫化物矿床、赤铁矿床、Au矿床和U-V矿床等。更有趣的是近年来还发现了许多金属如金、银、铜、铅、锌、钡、铀、钒等与油气藏伴生，一些油气分布区同时也是金属矿富集区，在流体运移中，烃类与金属之间可能存在复杂的相互作用，油气在金属矿床中也可能扮演重要角色。油气生成与金属成矿作用这种共生关系和成因机制的新认识对于金属矿床和油气研究来说都具有重大意义，而且势必影响到未来金属矿勘查的战略和方向。

3）流体成矿作用研究发展方向

根据当前国内外流体地质研究发展现状与趋势的分析，今后有关地球内部流体与成矿方面的研究应突出和优先开展两方面的研究：一是矿床和油气流体地质研究；二是地壳深部流体的性状与作用过程。为此，贾跃明（1993）认为需要侧重考虑以下主要科学问题：

（1）地壳内部流体来源及其对地质作用的控制过程。地壳内部流体具复杂来源，其中包括岩浆上升过程中因分解或结晶释放的流体；变质脱水-脱挥发分产生的流体；富水沉积物因压实或构造收缩挤压产生的流体、大气降水或海水下渗循环演化产生的流体、地幔排气作用和交代作用产生的流体。近年来，虽然对不同流体的化学组成和同位素特征提出了一些判别标志，但当多种来源流体强烈混合并演化后如何区分仍需继续研究。尤其是不同地质-构造背景和发展阶段下不同来源流体的相对贡献和影响并不清楚。业已证明，流体运动和作用过程控制着地壳中热和物质的分离、富集与再分配，但对流体控制和影响地壳内部地质过程的详细机理、方式和过程了解尚很差，需要继续研究。

（2）热、流体、化学成分与成矿作用。热、流体和化学成分是成矿作用的三大要素。热通常是成矿的驱动因素，流体在绝大部分情况下充当着成矿的主要媒介和作用剂，化学组分则构成了成矿的物质基础。可以说，流体成矿作用就是地质流体成矿系统中热、流体和化学组分三者之间相互作用和不断演化的过程。揭示这三者之间的复杂耦合关系，对于了解金属络合物在热流体中的结构和稳定性，烃类运移与汇集位置以及矿床和油气藏在不同地质-构造体制下的沉淀或聚积是至关重要的。

（3）壳-幔岩浆成矿系统。岩浆在壳-幔系统某些部位本身即是一种很重要的流体。岩浆在地壳内部的上升过程中，一方面可将溶解和结合在岩浆中的水和各种挥发分从深部搬运

到浅部，并因分解或结晶作用释放出来成为热液流体；另一方面则通过改变地壳热结构引起热液循环，并且可能影响大范围围岩的流体-岩石反应，或者上升岩浆直接与地下流体接触演变成新的热流体。一般认为，许多矿床（如块状硫化物矿床、碳酸岩型矿床、中高温热液矿床等）的成因都与结晶岩浆排出的热液流动沉淀作用有关。岩浆排泄流体的时间、空间和程度可能既取决于岩浆流体的初始成分，又取决于流体从岩浆中排泄的温度、压力环境。因此，壳-幔岩浆成矿系统是认识地球内部流体与成矿的一个不可忽视的方面。

（4）盆地中热流体系统与复合成烃机制。沉积盆地是煤、石油、天然气以及钾、铀、铅锌和高岭土等矿床形成与保存的场所。近年来地质-地球物理探测揭示，在一些现代沉积盆地存在着巨大的超压流体房。它们一旦被挤压变形发生破裂，就很可能发生大规模的活动热流体迁移。对一些古沉积盆地的研究也表明，因受（造山期间）构造挤压和地势抬升的影响，它们均发生过深部热卤水的大规模远距离运移。而且这种运移还控制了盆地中几乎所有油气藏以及层控型中低温热液矿床、区域性交代蚀变和温度异常梯度等的形成和分布。由于这方面的重要进展，有力地推动着当前（含油气）盆地分析进入到探讨流体动力学与演化的新阶段，同时也使得盆地中热流体系统具有重要的意义。对油气的有机与无机之争，尽管预言油气为无机成因占上风尚为时过早，但烃类有复杂成因和多种来源却已是事实。从深部（地壳 8～13 km 之下）油气勘探战略的角度考虑，无机或深源成因似乎更具指导意义。

（5）生物-流体-成矿系统。许多证据都表明，在地壳一定深度范围（至少可达 5 km）内还存在生物活动，这些生物是喜温厌氧的细菌或微生物。在地下较高的温压条件下藉深部热液化学能活动过程中富集大量 Au、Ag、Cu、Pb 等成矿元素，并改变流体的物理化学环境等方式参与或影响了成矿作用，从而构成了生物-流体-成矿系统。此外，关于微生物对流体化学（特别是地下水）的影响、流体运移对一些关键元素和有害元素的主要地球化学循环的控制作用以及矿物-流体界面的热力学和动力学等方面研究，也应给予应有的注意和重视。这些研究工作对于防止和治理水质污染、安全处置有害废物和更好地认识地表环境变化等具有十分重要的意义。

2.1.6 现代成矿作用

60 年代以来 Miller 等（1964）报道了红海深层热卤水正在形成层状铁、锰、铜、铅、锌氧化物和硫化物矿床。70～80 年代又发现太平洋海岭高热流系统及有关的块状多金属硫化物矿床，即在东太平洋中脊扩张带排放出来的含金属热卤水形成闪锌矿、黄铁矿等金属硫化物的黑烟囱。这些目前正在形成的沉积硫化物矿床对某些古代层状多金属块状硫化物矿床所提出的海底热卤水成矿、火山热液-沉积或喷气-沉积等成因假说，提供了较客观的实际依据。

1）现代海底矿物资源

加拿大学者 Scott 等 1986 年在东太平洋发现了 20 个以上正在形成或已形成的硫化物矿床（点），并论述了海底山脉和裂谷环境的火山构造旋回及与有关硫化物沉积的时、空分布关系以及块状硫化物的成分、分带和沉积条件等。在 30 届国际地质大会上探讨了块状硫化物矿床在三大洋分布的概况、在西太平洋的新发现及其特征，并对海洋与大陆硫化物成矿构造背景作了对比。Jambor 将块状硫化物矿床分成两类：①近源矿床直接受火山作用控制，矿体赋存于火山产物中，如中国的白银厂，有人称之为 Volex 矿床；②远源矿床远离火山机构，在海底有一定侧向迁移，矿体赋存于沉积岩或混有一定量的火山物质，如 Broken

Hill，Mount Isa 和 McArther River 等，有人称之为 SEDEX 矿床。这种喷气沉积矿床成因模式的研究也是国际上的一个热门课题。它在世界上分布广、数量多，而且储量也很大。

第 30 届国际地质大会的现代洋底矿物资源成矿作用和开发利用研讨会提出了如下一些新观点或新认识：①西太平洋位于太平洋板块西部，与欧亚、菲律宾等板块相接，包括深海盆、水下海山和过渡带沟-弧-盆系等一系列复杂的地貌单元，在不同环境下可形成含铂的锰结壳，低铜、镍而高钴的结壳，高品位磷块岩，热水沉积锰矿，块状硫化物和碳氢化合物等类型矿床，其找矿潜力巨大，其成矿环境与特征研究可作为大陆上相关矿床的对比标志，具有理论指导意义；②西太平洋的钴结壳和磷块岩规模巨大，结壳中含较高的贵金属-铂族元素，可综合利用；俄罗斯学者首次提出钴结壳和磷块岩由富辉橄玄岩与粗玄岩组合形成并与纬向构造带有关的看法；③发现了太平洋东部多金属结核中的生物成因的 Fe、Mn 成矿元素；④在对大洋矿产综合研究的基础上中国学者提出，海洋中的各种矿产，包括金属、非金属、贵金属及碳氢化合物是有机联系的整体，它们的成矿物源主要来自与地幔柱有关的流体。加拿大学者也认为，硫化物矿床的主要物源应为岩浆。即都强调地内因素起重要作用，而海水循环或元素活化仅居次要地位。内生物源规模巨大，且与构造活动有关，不同类型的构造地貌单元可形成不同类型的矿产。

2）活动地热系统

活动地热系统是最受人关注的现代成矿作用之一。新西兰的 Brondlands 地热尤为著名。围绕此喷泉口沉淀出非晶质砷和锑化物等，并含较高的金、银、汞和铊等元素，深部沉淀物中有锌、铅、铜等硫化物。此热泉是从上新世到全新世钙碱性火山岩中流出来的。

堪察加第三纪火山活动区的热泉系统也是现代成矿作用的极好例子。在 Apapel 热泉口发现辰砂、雄黄和蛋白石等，在晶洞中发现闪锌矿、黄铁矿、毒砂、铜蓝、辉铜矿、自然金和自然铜等。

中国台湾马祖的 Tatun 火山带的地热泉沉淀物中含有很高的砷、锑、银、铜、铅、锌和钡。近地表有明矾石、蛋白石、高岭石和埃洛石等酸性热液蚀变产物。

加利福尼亚索尔顿湖为富金属的地热系统之一。在 2470 m 深处热卤水温度达 360℃以上，富 NaCl，$CaCl_2$ 和 KCl 的热卤水总盐度（w_{NaCl}）达 35%，并富含铁、锰、锌、铅、银和铜等重金属，地热泉中沉淀出乳白色 SiO_2，其中含蓝辉铜矿、斑铜矿、辉铜矿、硫铜银矿、毒砂、黝铜矿、黄铜矿、黄铁矿和自然银等。

在第 30 届国际地质大会上中国、日本、印度、菲律宾、俄罗斯、南斯拉夫、伊朗等国学者认为地热资源的分布和类型取决于构造背景。很多高温地热资源分布于活动板块的边缘；许多与第四纪火山活动有关的高温水热系统沿消减带的火山岩前锋分布，而与陆-陆碰撞带内的“S”型花岗岩有关的高温水热系统则出露于缝合带的两侧。在日本海滨岸平原、华北平原和俄罗斯的内陆盆地有十分丰富的于新第三系至第四系沉积盆地储存的热水资源。

3）展望

从 30 届国际地质大会有关信息来看，当前对海洋矿产资源研究最为重视的是日本，其次为加拿大。他们的投资最高，技术装备也最先进，并取得了丰硕的成果。今后的重点或前沿课题可能是：①继多金属结核和钴结壳之后，受到普遍重视的是深水块状硫化物矿床。它不仅关系这类矿产资源的前景，也关系对地球内部构造和物质组成的探索；②深海油气

或碳氢化合物，资源远景巨大，可能是21世纪能源研究的重点课题，应予以高度的重视；③对海洋矿产资源的生物成因及其与地幔柱流体关系的深入研究，有可能对海洋矿产资源的开发远景及传统矿床学理论产生深刻的影响；④西太平洋是一个复杂的构造体系，具有形成多种矿产资源的成矿环境，可望成为一个极其重要的矿产资源基地，应加紧投入；⑤在沉积矿床研究领域，生物成矿作用和热水成矿作用研究相结合，现代和古代生物成矿作用研究相结合将会更富有成果。

2.1.7 微生物成矿作用

近年来微生物成矿作用越来越受到重视，它是现代成矿作用的一种重要类型。世界各国一些矿床，如中国的东川铜矿和滇黔桂微细浸染金矿的形成与微生物活动关系十分密切。80年代以来，随着生物学、环境科学、古生物学和一些矿床的深入研究，愈来愈多的新资料表明，尽管沉积矿床的最终形成是多因素、多阶段作用的结果，但早期的生物作用却是最重要的因素和作用阶段。生物成矿作用的研究现已开始受到广泛重视，正在成为当前地质科学研究的一个新的前沿和生长点。

1）微生物成矿作用研究的背景和意义

作为地球表层最活跃的地质营力之一，生物作用可以直接形成可燃有机矿产。一些非金属矿产如硫、磷的生物成矿作用研究也相继取得了一系列成果，对金属矿床的生物成矿作用研究也正深入开展。微生物可以在许多阶段（如沉积、成岩、构造和变质作用、成矿和风化等）参与作用。但在不同的成矿阶段微生物成矿作用的重要性和表现形式则完全不同。具体到某个特定的矿床的某个成矿阶段，可能是某种生物作用占主导。现代生物学研究和各种实验结果（如生物成矿试验和工业废水微生物处理试验），都说明微生物及其有机质对P、Fe、Mn、Mg、Cu、Pb、Zn、V、U、Cr、Ni、Mo、Co、Au、Ag、Pt、Hg、S、As、Se、Sb、I及许多稀有分散元素的析离、运移和沉淀都有很强的能力和显著作用。概括起来，微生物参与形成矿床的方式主要有以下几种（朱士兴，1993）：

（1）微生物直接聚集成矿元素的作用：微生物因生理的需要对许多元素或矿物质具有直接吸收和吸附的功能。微生物对许多金属元素都具有惊人的富集能力。在不同的环境条件下，它们的富集系数有较大的变化，并存在选择富集作用。例如，在主要由藻类和细菌组成的海洋生物群中，许多元素的富集浓度可以比海水中的浓度高几百倍到几十万倍。美国和加拿大的一些实验研究证明，海藻特别是小球藻对金具有很强的吸附能力，许多微生物聚金能力惊人，如加利福尼亚州菲格罗阿湖的藻席含金达18 kg/t。目前对微生物聚集金属元素研究较多的除了Fe、Mn外则是Au、Ag、Cu和Pb等。微生物成矿作用中微生物固定金属的机制不外是两种：一种是通过介质起作用；另一种是细胞直接与金属作用。许多金属元素对生物都有很大的毒性，但生物在某些环境下有很大的抗毒性。生物学家们研究发现，生物可以通过许多途径来消除这些不利因素而对某些毒性很大的金属有很强的吸收能力。微生物这些抗毒性机制为生物参与成矿提供了可能，因为在一些不利的环境中（如金属浓度很高），生物的抗毒性功能会打破金属在固液相之间的平衡，从而导致金属在固相中富集起来。

（2）微生物的生物化学沉淀作用：微生物在改变环境的物化参数上对成矿具有普遍意义。它的新陈代谢作用不仅能引起有关元素组合关系的转变和生成新矿物，还能改变周围溶液的酸碱度和氧化-还原电位，从而造成一个有利于某些新矿物沉淀的微环境，如硫化细

菌可使硫氧化形成硫酸根，并由此形成硫酸盐矿物；而厌氧呼吸型的反硫化细菌则能使硫酸盐还原而生成硫化氢，后者与金属作用会生成各种金属硫化物，形成还原型金属矿物。微生物在氧化条件下不仅形成局部的还原环境，并有一个使化学条件起变化的界面。

（3）微生物的生物物理沉淀作用：现代叠层石的研究表明，具粘液鞘的丝状构造叠层石微生物，由于它们的能动作用（颤动和趋光滑动），对海水中的矿物颗粒或含矿岩屑有很强的粘结和捕获作用。微生物形成的叠层石柱体和由它们组成的礁体由于使水动力状况发生突然变化（变小），从而使被搬运的矿物质或含矿碎屑在叠层石柱体之间或其礁体前后因受阻而发生物理沉积和富集作用。

（4）微生物产生有机质参与成矿作用：微生物的代谢作用或死亡后被分解能生成各种有机质，如有机酸、有机碱、有机质胶体和含碳物质。这些有机质热稳定性低，在成矿元素的活化、迁移、沉淀和富集过程中起着重要作用。这些有机质，有的与金属形成络合物-螯合物进入沉积物中，在成岩作用时释放出金属或被置换形成更稳定的络合物；有的（有机胶体和微粒）可通过物理吸附作用而富集大量金属离子。有的（如有机碳）是还原剂，使易溶的高价离子还原成难溶的低价离子，从而使它们沉淀和富集。例如：日本用含腐植酸的泥浆处理重金属废水，对 Hg、Cd、Cu、Ni、Zn 等离子的去除率达 98%以上，中国有人用腐植酸煤和腐植酸树脂处理含 Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 和 Co 等离子的工业废水试验也获得理想的结果。近年来，对矿床中流体包裹体中有机质的研究，更进一步说明了有机质是微生物参与成矿的证据之一。

2）微生物成矿作用研究内容

（1）生物成矿作用的证据和标志。为了开展本项工作首先必须要有生物成矿作用的充分证据和标志。为此，需进行 3 个方面的研究：①对矿床全面开展古生物学及其生物沉积构造（如叠层石、核形石、珠粒、凝块石等）的研究，提出生物成矿作用的直接证据；②对含矿岩系、含矿层和夹层分别开展生物矿物晶体学、微量元素、稳定同位素和有机地球化学的研究，确定生物成矿作用的间接标志及其标志物的类型和特征；③通过对含矿岩系与非含矿岩系以及与其他矿种含矿岩系的比较，确定与该矿床有关的古生物、生物沉积构造以及生物地球化学标志物的特点和专属关系。

（2）生物成矿作用的方式和机理。①将上述古生物和生物地球化学资料与矿床形成的地质背景、岩相古地理和矿石结构、构造资料相结合，对生物成矿作用方式和机理问题提出推理性的意见；②进行模拟实验，结合其他实验结果（如大量的处理工业废水的试验资料）丰富和完善上述推理性的认识，并最终提出科学的关于生物成矿作用方式和机理的意见。

（3）矿物分带与生物相分带关系。为了探讨新的找矿标志，还要进行以下的工作：①研究矿床中的矿物分带，了解其具体的时空分布规律；②研究矿床中古生物相与沉积相的分带，阐明其与矿物相分带的关系；③研究并确定不同矿物带生物地球化学和生物标志的特点（朱士兴，1993）。

通过上述研究，最终以新的资料和观点总结出不同矿床的分布规律和找矿方向。既有科学的成矿理论又可指出实用的找矿标志。在以上各项研究中，应以生物成矿作用的证据和标志的研究为主，因为它们是形成结论的出发点和最基本的立足点。

3）微生物成矿作用研究新进展

微生物成矿作用研究得较多的矿种主要有 Fe、Mn、Au、Cu、S、P 等（殷鸿福等，1994）。

对铁矿来说，微生物成矿作用是肯定的，沼铁矿、湖铁矿和海相铁矿都曾被看作是细菌成因的。在前寒武纪条带状含铁建造中已发现了越来越多的微化石，如中国、澳大利亚和加拿大均有这类与微生物作用有关的铁矿床。但构成生物成矿的直接证据不多，尚有赖于沉积环境中存在的“生物成因构造”。近年来发现一类能在其细胞内合成磁铁矿的趋磁细菌（magnetotactic bacteria），为细菌参与成矿作用提供了直接证据，这是铁的生物成矿研究中进展较大的一点。日本和中国学者分别报道了现代生物成因的条带状铁矿和古代微生物成因的铁矿（宣龙式）二者的结构有不少相似之处。

对锰矿的生物成矿作用研究也较多，如乌克兰 Nikopol，奥地利 Tannengebirge 地区的矿床，格鲁吉亚的 Chiatura，澳大利亚的 Groote Eylandt 矿床以及中国的湘潭式锰矿，但多数是根据生物成因构造推断其为生物成矿的。中国南方震旦纪碳酸锰矿床中已经发现了比较明确的沉积和同位素地球化学证据，表明有机质积极参与成矿过程。近年来，从大洋底锰结核中分离出了一系列氧化锰细菌，并进一步发现了许多锰结核是锰质超微叠层石，这一发现开辟了锰的生物成矿作用研究的新方向-超微叠层石与锰矿的关系。近年在太平洋东部克拉利昂-克里帕顿盆地发现多金属结核中的锰矿物是生物成因的，结核的壳层是生物叠层石，并首次鉴定出太平洋螺球孢菌和中华微放线菌仅存在于叠层石的柱状体和文层等生物结构范围内，说明其为生物成因结核，并认为结核中的 Fe、Mn 等成矿元素是洋底纳米级微生物从海水溶液中吸取到体内，并在死亡后继续保留下来的产物。中国学者还提出了 Fe 和 Mn 分异的微生物学证据。

金通常是不活泼元素，但它在生物学上是非常活跃的。金具有显著的亲生物性，能够聚金的生物很多，金的生物成矿作用研究得较多的有南非的 Witwatersrand 砂砾岩型金铀矿床，该矿床中的许多纤维状晶粒显示出生物的结构。砂金的生物化学成因研究也较多，如阿拉斯加和中国一些地区的砂金矿被认为是与细菌作用有关的。在阿拉斯加砂金矿中发现了金矿化的微生物结构，金被彻底溶解后可以见到类似土微菌（*Pedomicrobium*）的一种芽孢菌存在，这是金的微生物成矿作用研究中最重大的进展。在 30 届国际地质大会上有多篇论文涉及微生物与金矿的成因联系。近年来，国内、外不断取得重要进展，如在块金中发现了细菌微生物的结构，还报道了某些种属的藻类明显具有富集金的能力。中国四川白孔隆沟金矿中分离出来的细菌和霉菌均有很强的聚金能力，它们具双重作用，在其生长的初期和中期吸附和聚积金，而在生长后期，则对金进行还原。

对铜、铅、锌等硫化物矿床来说，首先，生物及其有机质能够还原 SO_4^{2-} 或代谢有机硫化物提供 S^{2-}；其次，许多微生物如真菌的孢子和菌丝能够吸收数量可观的铜、铅、锌。生物成矿作用研究主要集中在元古代与叠层石有空间联系的层控铜矿床、含铜页岩中的铜矿床、密西西比河谷型铅锌矿床、同生喷气成因铅锌矿床。在现代洋中脊的热泉喷口附近可见这种微生物成矿作用，这里生活着摄取从喷口喷出的 Cu、Pb、Zn 的细菌等微生物。

对硫、磷等矿种的微生物成矿作用研究也较多。另外，对一些铀矿、钨矿、银矿、铝土矿等的微生物成矿作用的研究也取得了一些成果。

4）微生物成矿作用的重点研究方向

微生物成矿理论研究开展较晚，需要研究的领域较多，以下几个方面可进行重点研究

（殷鸿福，1994）：

（1）“生物-有机质-流体”成矿系统的研究。目前生物成矿作用研究虽已获得了许多微生物参与成矿的证据，但尚缺少生物成矿作用的系统研究，孤立的生物成矿作用研究很难有大的突破，必须从发展的角度来研究生物成矿作用的演化，因此，“生物-有机质-流体”成矿系统的研究显得尤为重要。这是从成矿系统发展和联系的观点来研究生物成矿作用的演化，即系统地研究从活生物体的成矿作用（如预富集作用）到生物体演化为各种有机质的成矿作用（如溶解、富集作用），再到演变成有机流体时有机流体的成矿作用。

“生物-有机质-流体”成矿系统常见于盆地-造山带中。早在70年代初人们就已注意到了油气矿床和某些金属矿床可能的成因和空间联系问题。例如，加拿大西北部的阿尔伯特油田附近发现了派恩帕特大型铅锌矿，在索马里含油气区发现了科罗拉多高原型钾钒铀矿床等。近年来，不仅在油气区找到了一些金属矿床，并进一步发现了油气田可能与某些活泼金属矿床存在成因联系。目前，该项研究已发展到探讨含油气盆地中有关金属矿床产出的相对位置及普查标志阶段，涉及到Hg、Sb、U、Mo、Au、Cu、Pb、Zn等许多矿床。与油气矿床相伴的金属矿床中包裹体的研究表明，金属矿床的成矿流体类似于油田卤水，成矿流体中的有机质亦具有相似的性质。“生物-有机质-流体”成矿系统的研究揭示了这两类矿床的本质联系：在原始盆地接受沉积时，大量生物体为油气的形成奠定了物质基础，同时对金属成矿物质进行预富集作用，又为金属矿床的形成提供物质基础；在成岩过程中，生物体转化为有机质及有机热流体，对金属成矿物质具溶解、萃取和富集作用；在原始盆地-造山活动中，有机热流体向造山带运移，流体携带大量成矿物质，使金属成矿物质发生迁移；各种不同流体（如油气盆地的有机流体、造山带富含金属的流体等）的循环、汇合，最终会导致金属矿床的形成。这种成矿系统的研究不仅能完善和深化生物成矿以及前述的流体成矿的理论，而且还能指导找矿。

（2）综合对比研究现代的与古代的生物成矿作用的机制和条件。将今论古是地学研究领域的一项重要原则，许多生物成矿作用的认识也都是来自对现代生物成矿作用直接观察和研究，如洋中脊海底热泉喷口区的生物成矿现象，大洋锰结核的细菌成因说，砂金矿的细菌或生物-化学成因说，合成磁铁矿的趋磁细菌的发现等。对现代生物成矿现象的研究可以了解到生物成矿的机制，如生物富集、沉淀金属的方式以及参与成矿作用的生物生理学、形态学特征。只有在解决了这些问题的基础上，才可能对古代典型矿床进行令人信服的生物成矿作用的研究，了解古代生物在岩石沉积、成岩、变质等不同阶段所发生的变化及所起的作用，了解古代生物成矿作用的过程，从而避免只从形态学特征来讨论生物成矿作用。因此，现代和古代地质历史上的生物成矿作用，即与生物作用形成的矿床联系起来研究，是生物成矿理论一个很重要的研究方向。

（3）从生物地质学的其它相关分支学科角度综合研究微生物成矿作用：生物成矿学是一门生物学与矿床学之间的边缘学科。其研究必须与生物地质学中相关学科如生物矿物学、生物地球化学等结合起来。例如，某些细菌在吸附金离子以后会把它还原并长成晶体，金晶体长大以后就会从细菌上脱落下来，因此，必须从生物矿物学角度详细研究这些细菌成因的金晶体，才能区别这些矿物的有机和无机成因，为生物成矿作用提供证据，使生物成矿理论得以发展。

总之，必须从两方面研究发展生物成矿理论，一是研究生物成矿作用的机制、过程等

生物本身的内部因素，二是研究生物成矿作用发生的外部条件如沉积环境等。一句话，系统地、综合地、对比地研究生物成矿作用的演化是发展生物成矿理论的关键所在。

2.1.8 成矿模式与成矿系列

成矿模式和成矿系列的概念已广泛地为广大矿床地质工作者所接受和运用，并不断增添新的内容，在找矿实践中正在起着重要的作用。

1）成矿模式

成矿模式是一组相似（或同一类型）矿床特征的综合地质表征，是对同一类型的每一个矿床基本地质特征的系统整理，并归纳出具有一定理性认识的、反映该类型矿床共性的标准样式，从而为矿产地质工作者辨认该类型矿产的全貌、发现该类型矿产中的某一矿产或新类型矿床提供类比模式。此概念主要是从国外引入的，它是对某一矿床类型的成矿地质背景、矿床地质特征、矿物组成、分带、围岩蚀变、矿质来源、成矿物理化学条件、成矿机理等成矿全过程的理论总结和概括。矿床模式这一概念的建立是由矿床分类学长期研究而发展起来的。同一类事物具有共同的性质，分类就是为认识其共性并从共性中发现个体提供有效的方法。随着矿床地质研究和矿床勘查工作的发展，V. Clark 在 20 世纪 60 年代初提出了矿床模式的概念，即把已划分出的矿床类型的地质特征进行模式化；至 70 年代中演变为与矿床类型的地质环境和成矿地质特征相结合的标准模式（R. G. Roberts 和 P. A. Sheahan）；60 年代以来，矿床模式的研究，在矿产地质领域已获得空前发展，其中对世界级典型矿床，如斑岩铜、钼矿床、黑矿矿床、热泉型金矿床、密西西比铅锌矿床等等，建立了完整的矿床模式并由加拿大（R. G. Robert 等，1989）和美国（D. P. Cox 等，1987）地调所出版了矿床类型和矿床模式专著，较全面地反映了成矿地质规律，对找矿起到了很大的促进作用。例如美国克莱梅克斯斑岩钼矿模式的建立，在科罗拉多成矿带范围内取得十分明显的找矿效果，在 20 年内先后发现了亨德逊和埃孟斯两个大型隐伏钼矿床，钼矿储量增加了一倍以上，为美国钼矿储量居世界前列做出了重要贡献。近二十多年来日本黑矿的进一步大量发现，也应归功于黑矿成矿模式的研究及与深部地球物理工作的结合。我国在对矿床成矿模式研究的基础上，于 1974 年提出区域成矿模式，李文达、陈毓川等在 1975、1983 年在长江中下游宁芜火山岩成矿带内建立了“宁芜玢岩铁矿成矿模式”，把此地区与中生代大王山火山旋回有关的相互在时、空与成因上有联系的各类金属、非金属矿床统一构成区域成矿模式，为发展区域成矿规律研究开拓了新的方向。20 世纪 80、90 年代区域成矿模式的研究在我国得到广泛的发展，对区域成矿工作起到了促进作用。

裴荣富等（1994b）在对矿床模式的研究中对下列问题进行了探讨：①矿床模式研究的目的是建立一类矿床地质特征的综合样板，为发挥其在地质勘查中的找矿作用，除应遵循普通属性的类比原则外，还应重视类比的外推，尤其应重视既求同，又求异的原则；②矿床模式一词是国际通用的，它是对一类型矿床最基础的总结研究，也是成矿（因）模式、找矿模式、数学模式、定量模式等模式研究的基础，矿床模式建立得越完整，其他模式的效应也越佳；③矿床模式的综合表征应是具有足够品位、储量（吨位）和一定经济潜力的矿床，矿化太弱或不能形成矿床者不能建模；④矿床模式的研究方向和建立的原则应力求是开放的，以利新内容和新模式的增补，不断修改补充，日臻完善。

近 20 年来国内外都把对矿床模式的研究作为矿床学研究的前沿，国际地质科学联合会（IUGS）和联合国教科文组织（UNESCO）联合制定了矿床模式计划（DMP）。其宗旨是提

高地球科学知识，将矿床模式用于资源的勘查、评价和开发，自 1984 年开始至今一直开展学术交流。在第 30 届国际地质大会上国内外学者对一些铜、铅-锌、金、钨等矿床提出了成矿模式。中国自 1974 年提出玢岩铁矿成矿模式以来，在南岭、长江中下游、三江、秦巴等地区以及对全国主要矿床先后建立了矿床成矿模式与区域成矿模式，不少矿区还建立了地质-地球物理-地球化学找矿模型，对矿产勘查起到了促进作用。这方面的研究正向建立动态的、考虑时间因素的反映四维空间的矿床及区域成矿模式方向发展。

2）成矿系列

矿床的成矿系列概念是中国地质学家程裕淇等（1979、1983）提出的。它是研究成矿作用在四维空间中的规律，探索在地球发展过程中成矿的时、空演化及分布规律，从而提高对全球地质规律的认识，以更有效地指导矿产预测工作，促进矿床资源的勘查。这个研究方向是当前矿床学研究的前沿领域。在地质历史中成矿的演化是多年来历届国际地质大会矿床学领域中重要的学术讨论课题。

矿床成矿系列概念的建立是我国几十年来矿产勘查和矿床研究工作经验和认识的概括，其含义是：在一定的地质历史发展阶段所形成的地质构造单元内，与一定的地质成矿作用有关，在一定的地质构造部位形成不同矿种、不同类型而且有成因联系的矿床组合，称为矿床成矿系列。这是四维空间中具有内在联系的矿床自然组合——一个成矿整体或成矿体系。矿床成矿系列的研究内容是：建立在各地质历史发展阶段各地质构造单元中的矿床成矿系列及其成矿模式和成矿规律；探索矿床成矿系列在地球演化过程中的时、空及成矿物质演化规律，并在此基础上探索地球演化规律；编制地区性、全国性、全球性矿床成矿系列图件；建立矿床成矿系列的矿产预测系统及信息系统，指导矿产勘查工作。程裕淇等在 1975～1983 年根据我国广大矿床地质工作者在长江中下游、南岭等地区长期进行矿产勘查和成矿规律研究的基础上不断完善矿床成矿系列的概念。成矿系列把成矿区域地质背景、地质作用演化过程和在时空成因上相关的各种矿床类型联系起来进行研究，进行区域成矿规律研究及成矿的地质预测，成矿系列的提出，具有重要的理论与实践的意义。

矿床成矿系列概念视成矿是地质历史发展过程中所形成的地质环境中的组成部分，其本身是四维空间中的成矿整体，它们在地史演化过程中从空间的分布、成矿物质的组成都经历着演化，并有一定规律。这方面的研究目前还处于初步阶段，但从近 20 年来不断研究与应用情况看，此概念具有生命力，今后应着重研究：①继续进行矿床成矿系列的基础性研究工作，从成矿带（区）研究至全国建立矿床成矿系列系统，编制相应图件，总结区域及全国的成矿规律；②深入开展重点地质构造地区的矿床成矿系列及在时、空、成矿物质的演化规律研究；③在面上基础性研究和重点地区研究基础上，进一步完善和发展矿床成矿系列概念、研究方法、成矿系列体系的内部结构以及有关形成矿床成矿系列的叠加、改造、再造、演化等问题；④矿床成矿系列的研究要充分应用本地区及邻区已有地质、地球物理、地球化学等方面的工作成果，与之紧密结合，深化综合研究的广度和深度；⑤从周边国家及重点地质构造地区起步，开展全球矿床成矿系列的研究；⑥努力开展以矿床成矿系列研究成果去研究区域与全球重点地质问题，探讨其地质演化及规律；⑦进一步应用矿床成矿系列概念及研究成果进行成矿远景区域规划，不同比例尺的成矿预测，并在此过程中完善预测方法，提高预测可靠度，促进矿床勘查工作（陈毓川，1999）。

2.2 主要矿产勘查的成就与展望

80年代以来世界矿业萧条，这是因为70年代中期以后世界主要发达国家开始进入后工业化社会，其经济增长率大大高于矿物原料的需求增长率，但矿产资源在世界经济发展中的基础地位没有变，从地下采出的矿物原料仍占社会所需自然资源的70%以上。目前世界上大约开采200种矿产，石油、天然气等能源和基本金属极大地制约着各国经济的发展。因此，高风险的矿产勘查业仍为各国所重视，因为成功的矿产勘查是矿业的生命线。

2.2.1 地质找矿的重大进展

1）全球矿产资源潜力大，新发现的巨型矿床多

从1984～1994年的统计资料看，发现了不少重要矿床，尤其是能源矿产、金、铜、铅、锌、稀有金属矿和金刚石等，还发现了不少超大型矿床，这说明全球矿产资源的潜力是巨大的。同时，从这10年新发现的矿床可以看出，它们有5个特点。①油气在新区、老区均有发现，尤其是在地质研究程度较低的地区发现较多，而且发现海上油气田越来越多，且深度加大。包括结晶岩在内的基底油气藏和盐下油气藏这种新圈闭类型的油气在各地的发现也不少，扩大了油气勘查的思路和领域。②多数金属矿床是在已知矿带、矿区、矿田范围内，甚至在已知矿床的深部和旁侧发现，这一方面说明成矿区带的找矿潜力，另一方面也说明按成矿区带布署找矿工作始终是发现新矿的多、快、好、省的途径。③新区域找矿效果明显，新识别出的智利马理昆加金矿带，加拿大西北地区和印度尼西亚松巴哇岛斑岩铜金矿区等，均是通过区域系统勘查和多种方法配合突破的。说明全球仍有许多未被认识的矿化集中区，因此全球发现大矿的潜力还很大，而且机会也多。④新发现矿床的主要类型有：不整合型铀矿、砂岩铀矿、绿岩带金矿、卡林型金矿、火山岩区浅成热液型金银矿、斑岩铜金矿、黄铁矿型铜多金属矿、喷气沉积型铅锌矿、碱性岩型稀有金属矿、金伯利岩型金刚石矿等，说明这些已知的类型仍是找矿的主要对象。⑤30届国际地质大会对海洋矿产资源前景的研究很关注，如铁锰结核、多金属结核、富钴锰结壳，海底热液多金属硫化物，含铂钴结壳、磷块岩和潜力巨大的海底天然气水合物等均具有广阔的远景。

2）矿产勘查的新思路，找矿的新线索

(1)“经验模型”与“概念（理论）模型”（施俊法等，1996）。在矿产预测工作中，一直存在着所谓“经验模型”与“概念（理论）模型”之争。80年代末，在国际上逐渐形成了以Woodal为代表的矿产勘查哲学。指出当概念的和经验的证据相印证、理论与实际观察有力地证实是可信时，就可能发现新矿床，例如奥林匹克坝Cu-Au-U矿床。这两类模型的信息成分在不同程度上互相参杂，经验模型的发展将修正和扩充概念模型，而概念模型则可以指导经验模型的应用与解释，两者相互依存，相互补充。

在经验和理论的勘查战略中，资料（信息）获取是第一性的，对于勘查者来说，无论何时最重要的是客观地收集与矿化有关的各种信息，早期依据野外露头找到大量的矿床。70年代以来，随着露头矿和易识别矿的减少，地质学家更加注意成矿理论和概念（理论）模型，从而促进了找矿工作，也发现了一些矿床。但从根本上讲，概念（理论）找矿这种思路，最终要依靠经验数据来达到找矿目的。因此，概念（理论）找矿实质上是一种间接找矿方法。80年代以来，现代勘查技术得到了迅猛发展，现代找矿已跨入一个新的历史阶段

——“信息找矿”阶段。信息找矿本质上也是一种直接找矿，它主要依靠经验信息，尤其是物质信息，进行靶区优选。在实施过程中，它将经验模型与概念模型有机地、动态地结合起来，符合矿产勘查的总趋势。

(2) 矿床的继承性、亲缘性及其找矿思路。长期以来，在矿床研究领域里，人们特别注意矿床与岩石性质的关系并以此为基础进行找矿勘探。60年代以来，谢家荣（1963）提出：任何一个旋回中都可能发生再生矿床，包括沉积矿床及风化剥蚀矿床在内。到了80年代，从这一思路进一步发展出如下概念：金属区是指在岩石圈中某一种或几种成矿元素丰度较高的地区。矿床的亲缘性是指在某一种或几种金属元素丰度较高的一部分岩石圈中形成深部同源的不同时代、不同类型的该类金属元素的矿床。矿床的继承性是指较老的矿质经过后期的活化、迁移、富集形成较年轻的矿床，如在某一地区发现了某一时代某一类型的矿床，应当继续在这个地区根据有利于这种金属富集的成矿地质作用，进一步寻找是否还有其它时代、其它类型的（内生的、外生的或变更的）同一矿种的矿床。由此开辟了区域找矿的另一思路（Chen Tingyu，1989）。

(3) 找矿的新线索。矿产勘查面临着寻找深部矿、隐伏矿和难识别矿，许多传统的理论和思路已受到挑战。近年来在金属矿产勘查实践中引发出来一些新的找矿思路，为寻找新矿床提供了新线索：①寻找隐伏斑岩铜矿和金矿的热液系统模式，例如在火山岩区许多斑岩铜矿系统高部位多发育有浅成热液贵金属矿脉，它们发育在上部泥化蚀变带内，是斑岩铜矿系统上部火山岩段的一个组成部分，它们共同组成火山岩区的热液系统；②指导寻找深部隐伏金矿的思路，例如美国卡林金矿带不断发现隐伏的大金矿，为具类似地质条件产出微细浸染状金矿的地区进一步找矿指明方向，此外，含金剪切带的概念也为寻找深部金矿提供理论依据；③沿着“派生矿”轨迹找矿的新思维，例如奥林匹克坝矿床是其上部阿德雷德沉积铜矿（赞比亚型）的原始物质来源，阿德雷德铜矿是奥林匹克坝矿床的“派生矿”，这为在铜带的基底岩石中找到类似的奥林匹克坝型矿床提供了新的思路。

2.2.2 能源矿产

1) 石油与天然气

近10年来，世界油气勘查取得了重大成就，发现了许多重要的大油气田，例如：挪威的海德鲁姆油田，巴西的马利姆油田等十几个新发现的大油气田大多位于海域深水地区。加之，欧佩克国家拥有丰富的油气资源和过剩的石油生产能力，保证了石油市场的供需平衡。

近年来开拓了一系列油气勘查的新领域。①深层油气勘查：近年所发现的10个大型油气田其埋藏深度都大于4000 m。在深层油气勘查领域中，不可忽视的就是对基岩产油气的研究。②被动大陆边缘盆地勘查：这是一个重要的油气勘查新领域，被动大陆边缘及裂谷上形成的盆地具有较大的油气潜力。研究表明，大多数深部油气储量（石油63%，天然气53%，凝析油86%）赋存于古老被动大陆边缘区。③中新元古代地层的油气勘查：在东西伯利亚里菲系地层中发现大型工业油气藏之后，使找油的地层下限推到更老的中新元古界。④天然气水合物是21世纪巨大的潜在能源：天然气水合物是一种碳氢气体与水分子组成的白色结晶状物质，在结构上它是一种笼状包合物，有“可燃冰”之称，它形成于低温（0～10℃）高压（$>100\times10^5$ Pa）地质环境，产于水深超过300～500 m的海底与冻土带的沉积物空隙中。据估计，海洋面积的10%均有其形成条件。1965年在原苏联发现了世界第一个天然气水合物矿田（麦索亚哈气田）以后，它作为一种不同于煤和天然气的全新概念的能

源矿产，越来越受到重视。有的学者分析其储量约相当于煤层气和常规石油天然气总量的2～3倍。专家估算，全世界天然气水合物的潜在蕴藏量约为$2\times10^{16}m^3$，目前人们面临的主要问题是如何开发和不破坏生态环境。⑤陨石坑是找油气的新靶区：地球受陨星冲击可产生特殊的冲击构造，称陨石坑。例如加拿大的视野油田，美国的红翼河油田等。现已查明被淹埋的古陨石坑对找油气具有重要意义。⑥成熟区的深化勘查：深入老区勘探和研究可以说是一种战略性措施，加速老区的新发现要依靠老资料的重新处理，并应用新技术、新概念，特别要寻找隐蔽性油气藏，以探查潜在的新目标。同时，新的勘查技术在实践中取得了良好的效果，如三维和四维地震勘探、3C和4C多波技术、新一代遥感技术（超敏波谱）、盆地模拟技术、薄层高分辨率储量技术、合成地震记录和人机联作地震资料解释、计算机数据和图像处理、先进的深水勘探技术和流体地质学、地震地层学等新技术、新方法在加速油气勘探开发、提高效率和增加油气储量等方面都起了极其重要的作用。

油气成因研究的新进展有效地促进了油气勘查工作，近年来也取得了重大的成就。尽管油气有机成因说（干酪根热解）在理论和勘探实践中取得了主导地位，但对一些问题尚难以圆满解释。当前宇宙地球化学、板块构造学的兴起，以及深海及地球深部钻探研究为油气形成演化提供了新的信息和新认识：①黄第藩和B. J. Katz在30届国际地质大会上系统论述了生烃理论的研究进展，论证了未成熟油的来源，指出未成熟油直接来源于可溶类脂化合物，与富硫Ⅰ型干酪根生成的未成熟油不同，陆相盆地未成熟油直接来源于沥青，这些沥青反映了湖生藻类所含的原始脂类，缺乏大的官能团。未成熟油的发现及未成熟油的沥青来源突破了传统的干酪根热化分解模式，反映了90年代油气生成理论研究的一项重要进展。②关于煤成烃理论，世界上许多学者对此作出了重要贡献。煤成油是陆相生油理论的重要研究内容，亦是对“腐殖型有机质生气、腐泥型有机质生油”的传统观念的挑战。特别是通过有机岩石学和有机地球化学相结合，成果显著。如对各种煤及各种显微组分（镜质组、壳质组和丝质组）生烃能力和特点的研究表明，壳质组具有最佳的生烃能力，因其原始母质是各种富氢物质（即角质、孢子、木栓质体和树脂体），其次是镜质组，最低是丝质组。S. Thompson等1988年认为，即使不考虑煤中其他组分，只要煤中壳质组含量达2%就足以生成石油。在30届国际地质大会黄第藩等报导了中国西北的一些盆地侏罗纪煤系中找矿具有良好的前景。利用核磁共振波谱解叠技术，从煤干酪根化学结构中区分出油潜力碳（C_o），气潜力碳（C_g）和芳构碳（C_a），用以评价煤的生烃潜力。并指出烃源煤中普遍存在芳烃含量高于饱和烃的现象，其煤成油以轻质油为主，并提出煤成油的初次运移模式：从水相运移经油相运移。③在化石燃料地球化学研究方面，英国的S. R. Larter在第30届国际地质大会上从石油储层出发报导了石油二次运移指标。运移规模、输运层中油饱和的范围、饱和程度和残余饱和度等在二次运移解释中十分重要，此内容研究少而且争议大。该作者提出研究烷基苯、烷基咔唑和某些芳烃（如苯、甲苯）这些化合物的浓度和异构化分布反映了油/水分配系数和水/岩分配系数的基本状况，可用作为运移的示踪剂。美国的J. A. Curiale在会上系统报导了原油中发现的烯烃，这是国际上十分新颖的工作。许多原油和凝析油中不仅发现含有直链单烯烃和二烯烃化合物，而且还有烯烃生物标志化合物。如奥利烯和乌沙烯。此外，还鉴定出不稳定的烯烃化合物，如藿烯和重排甾烯等，并探讨了这些化合物的成因。法国的J. Connan报道了在石油地球化学中将沥青分析应用于考古学方面的研究。④板块构造理论的发展与应用既推动了油气有机成因说的深入研究和

迅速发展，同时，亦促进了生物成因学的研究。板块构造理论与有机成因说相结合，说明石油有机成因说有两种模式，即传统的沉积-迁移模式，称“生物外生说”，及板块俯冲模式成油，称“生物内生说”。该理论认为，热解作用可使沉积岩中有机质形成石油，也可使俯冲带内的有机质生成石油，俯冲带生油模式既含有有机成油因素，同时，亦掺有无机成油因素。所以，该学说与有机和无机成因都不矛盾。研究指出，世界上许多重要产油气区正是分布在古老或现代的俯冲带或边缘。⑤地球深源气说有进一步发展，该学说是Goldo在80年代初提出的，他认为地壳中天然气来源于地球深部上地幔物质的脱气作用。这个巨大的天然气源在地壳开始凝聚时，部分甲烷作为“化石气”留在地幔和地壳深部，然后通过岩石圈薄弱地区不断注入地壳，在缓慢向上运移和冷却过程中，部分甲烷聚合成高分子烃和石油。这种过程贯穿整个地质时期，至今仍在进行。B. S. 沃里沃夫斯基等指出，迄今世界上已知的超巨型内陆或大陆滨海区含油气盆地具有一共同特点，即盆地下面的地壳皆属异常的“无花岗岩”型。油气田的烃源主要是无机成因，源于深部的氢、二氧化碳通过地层中铁、镍、铬等矿物的催化作用生成。他们指出，“无花岗岩”型含油气区由无机成因的油气提供取之不尽的油气资源。除了上述石油成因和有机地球化学领域之外，在油气研究方面的其它重要领域还有：①高分辨层序地层学与储集体预测；②含油气系统；③含油气盆地及油气成藏过程的计算机模拟；④盆地动力学等。

2）煤

煤是世界上储量最丰富，分布最广泛的能源矿产，它是仅次于石油的世界第二大能源。从长远来看，全球对能源的需求会进一步增大，而油气资源保证程度较低，其供需缺口会逐步增大。由于受两次“石油危机”的冲击，80年代许多国家对煤田普查勘探工作都十分重视，并取得了重大进展。如80年代末查明了巴基斯坦信德省的塔尔大煤田。近几年，在乌克兰卢干斯克州的北部发现了3个新的动力煤煤田。英国在北爱尔兰发现了重要的新的褐煤矿床。中国煤田地质勘查也有新发现，如鄂尔多斯盆地煤的储量超过5000×10^8 t，居世界八大煤田前列，其特点是煤层层数多（最多达18层）、煤层厚度大（最厚处达60多米），盆地内气煤、焦煤、肥煤、瘦煤、贫煤、无烟煤、长焰煤等品种齐全，有的煤种还是国家稀缺煤种。

近年来，世界煤田勘探方法发展迅速。遥感、高分辨率反射地震、三维地震、综合勘探、计算机技术、层序地层学等新技术，新方法在加速煤田勘探、提高效率和增加储量等方面都起了十分重要的作用。

煤地质学研究也取得了重要的进展。在煤成因研究领域，科学家们重新将气候作为泥炭形成、聚集与埋藏的一个基本控制因素进行了研究，大量的计算机模拟扩大并支持了这项研究。厚煤层的成因也是一个受人关注的问题，第30届国际地质大会报导了“抚顺特厚煤层的沉积相和成因”的研究，发现煤层夹矸显示的滑塌沉积和碎屑煤与重力流成因的碎屑沉积呈互层出现，得出该区以异地成因煤为主的解释，这一问题在今后工作中应引起注意。在煤岩学领域，煤的分类研究、煤显微组分研究、煤岩学与有机岩石学的关系、成熟度的研究等方面均取得了新进展。如为统一对煤盆地的划分、勘探、研究和煤层对比，在同一基础上进行储量和资源的统计，国际煤及有机岩石学委员会（ICCP）提供了一个煤的地质成因分类方案，其分类参数为煤级、类型和相。近年来，对煤的显微组分研究发现了一些新的显微组分，它们是有活性和无活性两种惰性组、暗镜质组（原称腐泥腐殖组）、沥

青质体、荧光质体和渗出体等。煤岩学的研究方法已扩大应用到对沉积岩的有机物的组成、成因和分类命名的研究，促进了有机岩石学或油源岩石学的发展。成熟度研究的新进展主要表现在：一般情况下常采用镜质组反射率来测定煤级或成熟度，当沉积岩中镜质组很少时则用 *TAI*（熟变化指数）法、*CAI*（牙形刺变化指数）法、孢粉分析、壳质组荧光测定、沥青的反射率测量、笔石反射率测量等。此外，地热史的研究已进入综合运用各种方法的研究阶段，荧光方法已进入定量研究阶段。

荷兰的 W. Fermont 提出荷兰北部的格罗宁根巨型天然气田的资源量极其丰富，他认为大部分烃来自石炭纪煤，含煤率高达4%的威斯发阶几乎遍布于荷兰的陆地与大陆架。威斯发阶发育于海西前渊，曾经受海西造山运动、裂谷幕和阿尔卑斯运动的多次热成熟作用。煤层气的保存与其发生的时期关系密切，近期煤层气的生成与排驱增加了总储量。地史与热史的数学模拟提供了区分各时期成烃的方法，因此数学模拟可以增加煤层气勘探的成功率。有的学者从煤系沉积环境角度评价了煤成烃的规律，为煤沉积学的应用开拓了新领域。总之，煤层气是由煤化作用产生的，煤层气可能成为21世纪的重要能源，继续研究控制煤层气含量的地质因素和产气潜力是很重要的。

对煤田地质工作来说，除上述各项研究和勘探方法需不断加强外，还应进一步注意的问题有：①地质资料的计算机处理和展示分析，在这方面进一步研究用计算机对煤田地质资料进行分析解释和建立三维的煤沉积模式是很有意义的。②煤层气可能成为21世纪的重要能源，应是煤化作用研究的重点。③层序地层学在煤盆地中的应用可建立大区域内煤系地层的等时地层格架，是解释沉积盆地发展演化的新方法。由于煤形成于独特的环境下，可提供重要的环境证据。将煤沉积学与层序地层学结合研究将会对沉积盆地的发展演化提供更好的解释。④煤中硫、碳、氧同位素的研究，这种研究可提供沉积环境的有力证据，有助于提出更确切的古环境的定量证据，更好地解释盆地的发展演化。⑤现代湿地生态系统的研究，应继续研究泥炭形成环境的现代实例。⑥煤中硫的研究。⑦煤化作用（煤变质作用）。这种研究不仅具有理论意义，而且对解决有关构造学、地层学、油气勘查等问题具有实际价值，更重要的是它在寻找和勘探所需煤类方面的理论根据。

当前国内外对上述常规性的研究锐减，而突出强调的有下述问题：①煤中有害物质的成因、赋存状态研究；②煤开采、运输和应用过程中的环境污染，特别是煤中有害物质循环过程的地球化学追踪；③与煤转化为新能源（液化、气化和水煤浆等）和洁净煤技术有关的煤质和煤地质研究；④低有害物质的优质煤资源的分布规律研究和找寻；⑤煤层甲烷的成藏与开放条件研究；⑥煤成烃（煤层气和煤成油）的地球化学过程和成藏条件的研究等。

3）铀

铀是重要的能源。1997年世界低成本铀资源量为 212×10^4 t，其中较多的国家有澳大利亚、哈萨克斯坦、加拿大、乌兹别克斯坦和尼日尔等，合计占世界铀资源量的70%以上。从世界范围来看，不可再生（石油、天然气和煤）资源量急剧减少。由于世界经济发展对能源需求的增长，核能已逐渐成为一个有巨大发展前景的能源领域。不久的将来，可能不得不逐渐加强勘查活动以发现和开发新的铀资源（新区和新类型），特别是经济效益好的低成本的铀矿资源。这已成为当前铀矿地质战线的紧迫任务。

铀在地壳中虽然分布很广，但富集成矿的却有限，尤其是形成高品位的大矿床则更少。

从时代分布上看，古中元古代、晚古生代和中新生代均有世界上最重要的工业铀矿床出现。尤其是元古宙集中了世界上最大最富的铀矿床，如加拿大、澳大利亚等的不整合型矿床，南非石英卵石砾岩型矿床，澳大利亚奥林匹克坝矿床等均产在元古宙地层中，说明元古宙地层具有特别有利的成铀前景，约占 60%，而中新生代约占 40%，具有一老一新的特点。从类型上看，铀的成矿类型很多，砂岩型、不整合脉型、砾岩型、裂陷角砾岩杂岩型、火山岩和花岗岩的热液脉型等铀矿类型占据了世界铀资源的绝大部分。铀矿分布的大地构造概况是：成矿时代老的铀矿主要在前寒武纪地区，成矿时代新的铀矿主要在环太平洋和欧亚海西褶皱带中间地块火山盆地和陆相碎屑盆地区。近年来，新区新类型不断出现。其中，较为重要的有中亚国家的层间氧化带型砂岩铀矿，俄罗斯西西伯利亚地台南部边缘及蒙古的古河道型砂岩铀矿，俄罗斯外贝加尔地区及蒙古东部地区的火山洼地铀矿和俄罗斯地台阿尔丹地盾钾交代铀矿等。

王正邦（1990，1997）提出，当前铀矿地质研究主要有两个重要的战略方向：一是寻找品位高、规模巨大的铀矿类型（澳大利亚和加拿大的不整合脉及奥林匹克坝型）。要考虑的最主要经济因素是 U_3O_8 平均品位大于 0.2%，含 U_3O_8 资源量在 1×10^4 t 以上的矿床，寻找大型、超大型铀矿仍是各国共同关注的热点问题。二是寻找品位虽不太高，但易于地浸和溶浸的规模巨大的铀矿类型（如可地浸砂岩型铀矿和可溶浸的火山岩和花岗岩型铀矿）。在价格方面要求达到回收成本低的矿床。这样不整合型、砂岩型就成为当前最重要的勘查目标，另有砾岩型、裂陷角砾岩杂岩型、火山岩和花岗岩的热液脉型、碱交代型等占据了世界铀资源的绝大部分。

2.2.3 黑色金属矿产

1）铁

铁矿资源是钢铁工业的粮食和发展钢铁工业的物质基础。世界铁矿石资源极为丰富，据美国地质调查局 1999 年统计[1]，1998 年铁矿石储量为 1400×10^8 t，储量基础 3000×10^8 t，现有储量足以保证全球整个 21 世纪铁矿石的生产，若按年产铁矿石 10×10^8 t 计，世界铁矿石储量足够开采到 2140 年。

铁矿资源分布广泛，但地理分布却很不平衡。原苏联、澳大利亚、巴西、加拿大、美国、印度和南非等国共占有铁金属储量的 84%，而其中的 74%集中在前三个国家。铁矿工业类型多，当前勘查和开采的铁矿主要类型有：

（1）前寒武纪含铁石英岩型铁矿床（受变质沉积铁矿床）及风化壳型铁矿床。这类铁矿床（包括与其有关的风化淋滤型富铁矿床）在世界铁矿石储量和产量中均占有特别重要的地位，常构成储量多达几十至几百亿吨的巨大铁矿区。如俄罗斯的库尔斯克磁异常区，乌克兰的克里沃罗格铁矿盆地，澳大利亚的哈默斯利铁矿区和中国的鞍山铁矿等。在国外主要是贫铁矿经风化淋滤而成的优质富铁矿，而在中国则以条带状硅质贫铁矿为主，少量为热液型磁铁矿富矿。

含铁石英岩型矿床一般具有储量巨大、产地集中、矿石成分简单、易采易选等特点，早已成为现代铁矿工业的主要开采对象。随着该类型贫矿石利用水平的不断提高和澳大利亚、巴西、印度等国及西非地区这种类型铁矿区的深入勘查和开发，加之世界铁矿总资源的

[1] 中国地质矿产信息研究院矿产室编．1999．国外矿产年评 1997～1998．北京：中国地质矿产信息研究院．

90%来自含铁石英岩，其风化淋滤后，形成的富铁矿石占世界富铁矿石总量的 70%，因此从长远来看，这种矿床类型地位的重要性必然是有增无减。

(2) 火山岩型铁矿床（包括火山沉积型矿床和产于火山岩体内外接触带的热液充填交代矿床)。火山成因铁矿床是指成矿物质全部或部分来源于火山作用的矿床，包括火山岩浆喷发、溢流、侵入及与其有关的火山期后气液活动过程中所形成的铁矿床。这类矿床在国外分布比较广，其中比较重要的有：原苏联土尔盖地区晚古生代磁铁矿矿床、阿尔泰-萨彦地区早古生代磁铁矿和赤铁矿矿床（这两个矿床的成因有争议，许多学者认为属夕卡岩型)、安加拉-伊利姆地区产在爆发角砾岩筒中的磁铁矿矿床、哈萨克斯坦阿塔苏地区泥盆纪的火山-沉积铁矿床和铁锰矿床，伊朗中部巴夫格区的元古宙磁铁矿矿床，智利晚新生代安第斯构造活化区的拉科磁铁矿矿床和德国西部泥盆纪兰-狄尔型赤铁矿矿床。在中国这类铁矿分布不普遍但不少为大型富铁矿，如海南石碌、云南大红山和宁芜地区一些与闪长玢岩有关的铁矿床等等。火山成因铁矿具有产地比较集中，单个矿床规模有时较大，矿石品位较高等特点，是比较重要的铁矿类型。

(3) 岩浆型铁矿床。主要有 3 类：①钒钛磁铁矿矿床。这类矿床在西方又以瑞典南部的典型矿区命名，称为塔贝格型矿床。世界著名的钒钛磁铁矿矿床（区）有：原苏联中乌拉尔的卡奇卡纳尔-古谢沃戈尔矿区、南乌拉尔西坡的库萨矿床组、南非的布什维尔德矿床、加拿大的马格皮耶矿床、中国四川攀枝花和红格铁矿等。这类铁矿在国外探明储量中占的比重不到 10%，是钒和钛的重要来源，因而在某些国家和地区具有比较重要的经济价值。②地台碱性岩建造中的磷灰石-磁铁矿矿床。这类矿床与褶皱带发育早期基性岩浆派生的碱性岩有关，属晚期岩浆矿床。在瑞典北部和中部、挪威、芬兰、原苏联等国家已知有这类矿床。其开采量约占世界开采量的 5%，主要来自瑞典和原苏联。③超基性-碱性岩-碳酸岩建造中的磷灰石-磁铁矿矿床。这种矿床通常产在中心型超基性-碱性岩浆杂岩体的碳酸岩岩体中。在波罗的地盾、非洲地台及加拿大和巴西等国均有分布。这类矿床矿石易选，可综合利用磷灰石。

(4) 接触交代-热液型（广义的夕卡岩型）铁矿床。这类矿床可细分为：①接触交代型铁矿床又称夕卡岩型铁矿床，大部属富铁矿和②热液型磁铁矿、赤铁矿和菱铁矿矿床与接触交代矿床相伴产出，由于矿石品位较高，矿石易选，这类矿床一直是比较重要的开采对象。

(5) 沉积型铁矿床。这类矿床主要包括古生代到新生代形成的鲕状铁矿床，按形成环境分为浅海相和陆相两大类：①浅海相沉积矿床的矿体多呈层状，含矿层位比较稳定，规模也较大。国外这类矿床主要分布在欧洲及其邻区，矿石含铁量一般小于 40%，个别可达 50%，磷含量一般较高，不易分选。②陆相沉积铁矿广泛分布于中新生代河湖相沉积中，一般规模不大，品位也较低。在俄罗斯和哈萨克斯坦有此类典型矿床。目前，在阿拉伯国家、纽芬兰、英国、法国、德国、乌克兰和哈萨克斯坦等国和地区仍在开采这类矿石。

此外，还有一些矿床，如我国白云鄂博矿床，归属问题一直有争议，还有待进一步研究。

赵一鸣（1994）认为我国铁矿地质工作应采取以下对策：①受变质沉积铁矿床应作为最主要的找矿对象，因为这类铁矿无论在国外或国内均是最重要的铁矿类型；②接触交代-热液型铁矿床是我国富铁矿的主要来源，应进一步注意寻找；③要加强我国西部等边远地

区铁矿资源的勘查工作；④加强对铁矿伴生元素的综合评价和综合利用研究。

2）锰

据美国地质调查局统计1998年世界陆地锰储量和储量基础分别为68000×10^4 t和500000×10^4 t，按近期产量计算，世界现有锰储量可保证开采80年以上。但我国钢铁工业的不断发展，锰资源尚不能满足需要，找富锰矿和优质锰矿已成为我国地质找矿工作的重要任务之一。锰是地壳上最丰富的元素之一，在各种地质作用中均可发生富集，因而在陆地上和洋底均分布有大量锰矿资源。

（1）产于陆地的锰矿。世界陆地锰矿床按成因可划分为沉积型、火山-沉积型、沉积-变质型、热液型和风化壳型五大类，其中热液型锰矿无多大工业价值，主要为海相沉积（含火山-沉积）型，而沉积变质型和风化壳型（硫化矿床氧化带锰帽除外）实质上是原生海相沉积或火山-沉积型锰矿床经区域变质或风化作用改造的产物。美国地质调查局D. H. 德扬等人在1984年调查了世界已知29个具有重要经济价值锰矿床（包括了我国瓦房子、遵义、乐平和湘潭四个矿床），统计得出了世界95%以上已探明的可采储量是来自海相化学沉积型矿床的结论。该结论也适用于中国，这类矿床合计占总数的90%以上。因此在解决我国锰矿问题时，首先必须分析研究世界和我国海相沉积锰矿床形成和分布的主要特点。在世界范围内大陆上的锰矿床虽可出现在各个地质时期，但主要集中在元古宙和老第三纪。而且集中分布于南非和原苏联，占世界已查明资源量的80%以上。锰储量最多的国家有南非、乌克兰、加蓬、澳大利亚、巴西、格鲁吉亚、中国和印度等。如南非的锰储量的95%集中在卡拉哈里矿区和原苏联的尼科波尔和大托克马克等大型和超大型矿床中。国外锰矿石富矿的比率较大，除原苏联以贫矿为主外，一般矿石的含锰量均在30%以上，最富者可达48.5%。我国锰矿赋存的时代不一，主要集中在泥盆纪（占总储量的34.5%）、震旦纪（25.5%）、二叠纪（13.8%）、三叠纪（10.7%）和元古宙（9.9%）。我国有五大类含锰建造，以硅质岩建造和黑色碳质页岩建造的含矿性最好，大型锰矿床多与这两类建造有关。

（2）现代海底锰矿。世界海底的锰资源比陆地上要多几倍。按海底锰质沉积的特点可分为铁锰（多金属）结核和富钴铁锰结壳。结核一般分布在碳酸盐补偿深度以下的海盆中，并含有铜、镍、锌、钴等有用组分。结壳则生长在最低含氧层以下，碳酸盐补偿深度以上的海山区上，其基底一般为玄武岩。有关海洋结核和结壳资源量的报道很多，数值差异很大。据Archer在1976年的估计有结核资源750×10^8 t（锰192×10^8 t）。由于海底结核和结壳除含铁、锰之外，还含钴、镍、铜、铂等多种有用组分，因此从60年代末开始，许多国家陆续加入了海洋资源调查的行列。已查明深海海底资源丰富，具有商业开发的潜力。但即使在开采和加工技术允许的前提下，尚有许多因素（政治的、社会的、经济的）制约着有关的开采活动，商业开采的时间到2010年尚不可能实施。

70年代以来，锰矿床成因研究工作蓬勃开展，其中有代表性的是：①美国地质调查所Mosier和Page根据海洋环境中913个火山成因锰矿床的统计资料，从板块构造观点出发，于1988年提出了“海洋环境中火山成因锰矿床的描述性模式和品位-吨位模式”。该模式主要适合于太平洋沿岸带中—新生代的火山成因锰矿床。②美国地质调查局Force和Cannos从一些巨大锰矿床属浅海沉积这一事实出发，以锰和铁的海洋地球化学性质为理论依据，在1988年提出“黑色页岩盆地周围浅海锰矿床沉积模式”，又称“分层盆地边缘锰矿床沉积模式”。③原苏联学者娒斯季斯拉夫斯基提出的原生锰矿床主要产在地裂作用形成的陆缘海或

洋壳扩张产生的裂谷区内，主要是海相火山-沉积型和热液-沉积型矿床。他把地史时期所有海相锰矿床的形成均纳入其所划分的各相对应的造海时期。还把传统上作为稳定地台边缘沉积型锰矿床典型代表的尼科波尔、恰图拉矿床、格鲁特岛锰矿床和我国的瓦房子锰矿床，均列为热液-沉积型矿床。由以上实例可见，从不同的成因观点或成矿模式出发，就需要在锰矿找矿工作的布置上采用与之相应的普查预测准则和方法。

1994 年刘曼华对我国锰矿找矿突破的可能途径和对策提出了如下建议：①有计划、有步骤地加强对我国已知含锰层位的详细研究，如我国成锰高峰期（早震旦世，晚泥盆世，晚二叠世和中三叠世）的几个含锰层位以及元古宙含锰地层的研究；②风化型锰矿床应作为寻找富锰矿床的主攻对象；③热液改造型锰矿床在找富锰矿中需给予应有的重视；④以区域成矿预测研究为先导，以有利成矿区带为重点开展找矿工作；⑤应重视海底资源的调查和勘探工作。

3）铬

世界铬铁矿资源极为丰富，储量巨大。据美国地质调查局统计，1998 年世界铬铁矿储量和储量基础各为 37×10^{8} t 和 76×10^{8} t。现有储量几乎可供世界整个 21 世纪的生产，储量基础可供全球几百年的生产和需求。由于资源高度集中在南非、哈萨克斯坦、津巴布韦、芬兰、印度和巴西等国，美国早已把其列为战略物资，许多没有铬铁矿或铬铁矿储量很少的国家主要依靠进口，很难保证得到长期稳定的供应，同时也促使一些国家勘查和研究低品位铬铁矿的利用问题。

世界所有具有工业价值的铬铁矿矿床都产于基性-超基性岩及其派生的岩石中，其地理分布比较局限。原生铬铁矿矿床从成因上看属岩浆分凝矿床。按矿床的几何形态及含矿岩石的岩性特征和构造环境，通常可分为两类：①层状铬铁矿矿床。这类矿床主要分布于南非、津巴布韦、芬兰和美国等地，尽管层状侵入体中铬铁岩的垂直分布和岩石组合彼此相似，但不同地区的层状铬铁矿矿床仍有明显差异。②豆荚状（透镜状）铬铁矿矿床。这类矿床广泛分布于褶皱区中（乌拉尔、地中海带和太平洋带）或古老地台和地盾上（巴西地盾、波罗的地盾和印度地台）。大型矿床主要发育于原苏联、土耳其、印度和巴西等国。原苏联肯皮尔赛和中国西藏罗布萨铬铁矿矿床均属此类矿床。某些重要矿床兼有两类矿床的特点。层状铬铁矿矿床占世界铬铁矿储量的 98%以上，但从目前产量来看，豆荚状铬铁矿矿床约占世界铬铁矿产量的 55%以上。③残积-坡积铬铁矿砂矿。属次要类型，在世界铬铁矿储量和开采量中不起重要作用。

4）钒

世界钒储量充足，美国地质调查局 1998 年统计探明储量 1000×10^{4} t 和储量基础 2700 $\times10^{4}$ t，能满足世界长期（约 135 年）的需要。钒主要分布在俄罗斯、中国、南非和美国。

目前对钒矿床的分类尚无统一的认识。可供开发利用的钒资源一般产于钒钛磁铁矿矿床、磷块岩矿床、含铀砂岩和粉砂岩型矿床中，通常作为副产品大量存在于铝土矿和含钽物质（如原油、煤、油页岩和沥青砂）中，其中岩浆型钒钛磁铁矿是世界钒的最主要来源。

(1) 岩浆型钒矿床。属于这一类型的主要是岩浆熔离和贯入成因的钒钛磁铁矿矿床，这类矿床规模巨大，是最主要的钒矿床类型，约占全球钒资源的 67%。如南非德兰士瓦布什维尔德杂岩体上带的钒钛磁铁矿矿床、原苏联乌拉尔山东坡的卡奇卡纳尔和古谢诺戈尔钒钛磁铁矿矿床以及中国攀枝花钒钛磁铁矿矿床拥有巨大的钒资源，瑞典、印度和澳大利亚

等国也有这一类型的矿床。

(2) 同生沉积钒矿床。这类矿床可分为两个亚类：①富碳质同生沉积物容矿的钒矿床是钒的第二个重要来源。如委内瑞拉在原油中，美国在黑色页岩中提取钒。中国南方震旦系、寒武系、志留系中的石煤含有大量潜在钒资源，有些地方的石煤已被开采提取钒，但大部分因品位太低而难以回收。②非碳质同生沉积物容矿的钒矿床。这类矿床主要包括产于某些沉积铁矿和钛磁铁矿滨海砂矿中的钒矿床，如原苏联和新西兰均有此类矿床。

此外，还有后生（受变质）钒矿床和表生钒矿床，这两类矿床目前意义不大，是潜在的钒资源。

2.2.4 有色金属矿产

1) 铜

全球铜资源潜力大，据美国地质调查局统计，世界陆地铜资源量估计为 16×10^8 t，深海结核中估计为 7×10^8 t。1998 年世界铜储量为 34000×10^4 t，其静态保证为 29 年，储量基础为 65000×10^4 t。其保证年限为 56 年。中国铜储量虽然仅次于美国和原苏联，占世界第三位，但可供开采的储量不足，铜进口量年复一年增加，铜资源较紧张的局势还将持续较长时间，成为中国有色金属矿产中缺口最大的矿种。

世界铜资源分布广泛，遍及五大洲，其中铜储量基础较多的国家有智利（23.7%）、美国（15.3%）、波兰、赞比亚、俄罗斯等国。从近年的找矿实践看，环太平洋斑岩铜矿带具有最大的铜资源潜力。东太平洋的智利安第斯斑岩铜矿带，80 年代以来又新发现了铜金属量在 500×10^4 t 以上的 5 个超大型铜矿（智利的科亚瓦西、楚基北、曼萨米纳、扎尔迪瓦尔和印度尼西亚的格拉斯贝格矿床），西南太平洋除印尼之外，菲律宾和斐济等也都新发现有大型斑岩铜金矿。

世界铜成矿类型多样，按其地质-工业类型可分为：斑岩型、砂页岩型、铜镍硫化物型、海相火山岩型、铜-铀-金型、自然铜型、脉型、碳酸岩型和夕卡岩型等。其中最重要的是前四类，它们占世界铜总储量的 96%左右，是目前世界勘查和开采的主要铜矿类型。尤其是斑岩型和砂页岩型各占世界总储量 55%和 29%。据初步统计，世界铜金属储量超过 500×10^4 t 的超大型矿床有 60 个左右，其中斑岩型 38 个，占 63%，占储量的 64%，而砂页岩型有 15 个，占 25%，占储量的 24%。现将这些矿床类型简述如下：

(1) 斑岩铜矿：这是世界最佳找矿类型之一。英国矿床学家 R. H. 西利托研究认为在大量硫砷铜矿脉之下可能有斑岩铜矿的存在，这就为寻找深部隐伏斑岩铜矿指出了方向，提供了思路。

(2) 砂页岩型铜矿：这种铜矿泛指不同时代沉积岩中的层控铜矿。加拿大地质调查局 S. S. 甘迪提出该类铜矿的原始物质来源是基底的奥林匹克坝型矿床，认为阿德雷德铜矿是奥林匹克坝的“派生矿”，这也为世界各地具有砂页岩型铜矿地区进一步找矿提供了新思路。

(3) 铜镍硫化物型铜矿：矿床主要出现在元古宙和中生代，产出在克拉通地区陆内裂谷。代表性的矿床有加拿大的萨德伯里、美国的德卢斯、俄罗斯诺里尔斯克和中国的金川等。

(4) 海相火山岩型铜矿：这是与海底火山作用有一定联系的含有大量黄铁矿和一定数量铜、铅、锌的矿床。产于加拿大地盾、西班牙-葡萄牙黄铁矿带和俄罗斯乌拉尔等地。这

类矿床常有后期叠加的大脉型或细脉浸染型金矿，往往规模巨大，有重要意义。

除以上四类外，铜-铀-金型和自然铜型也占有一定比例，特别是巨大的奥林匹克坝铜-铀-金型这种新矿床类型的出现更具重要意义，使其所占储量比例（4%）高出了海相火山岩型矿床所占比例（2%）。此外，各类型矿床往往相伴而生，如斑岩型多与脉型、夕卡岩型伴生，砂页岩型常与自然铜型、铜-铀-金型一起产出，海相火山岩型往往与铜镍硫化物型产在同一个地质单元内。因此，象夕卡岩型铜矿在许多国家将其储量计入斑岩型矿床中而未单独列出。

据芮宗瑶等（1997）对铜金属大于 5×10^4 t 的矿床统计，我国铜资源量在 5 个主要矿床类型上的分配如下：斑岩型 42.1%，夕卡岩型 22.3%，海相火山岩型 15.0%，砂页岩型 11.3%和铜镍硫化物型 7.3%，鉴于我国铜矿资源短缺的局面短期内难以解决，应实施铜矿专项找矿工程，在东部寻找隐伏矿床，扩大老区远景，在西部沿古丝绸之路和“三江-雅江”流域两条路线向周围展开，重点抓斑岩型、海相火山岩型及铜镍硫化物型矿床，以求取得重大的突破。戴自希（1999）认为我国中西部地区勘查程度相对低，有相当的找铜潜力，该地区保有储量占全国铜储量的 91%，已发现的大型铜矿 25 个，中型 90 多个，近年来在新疆、云南、甘肃、内蒙古和四川等地均有上述 5 种主要铜矿类型的新发现，说明中西部地区具有较好的找铜前景，应加大勘查力度，寻找大铜矿和富铜矿。

2）铅和锌

世界范围内铅锌资源是丰富的，据美国地质调查局 1999 年统计，世界已查明铅锌资源量约为 15 和 19×10^8 t。现有铅锌储量可保证世界矿山分别开采 23 年和 20 年。世界铅锌储量和储量基础较多的国家有澳大利亚、美国、加拿大、原苏联、中国和秘鲁等，它们合计占世界铅锌储量基础的 74%和 63%。据初步统计，世界铅锌金属储量超过 500×10^4 t 的超大型矿床约有 44 个，其中美国、加拿大、澳大利亚这 3 个国家集中了世界上约 50%的超大型铅锌矿床。近年来，虽然对铅锌勘查投入较少，但不断有新矿床发现，说明全球铅锌资源潜力大。

全球各个历史时期均有铅锌矿床产出，但以元古宙和古生代最为集中，占世界总储量的 80%以上，中新生代的铅锌矿床相对较少。铅锌矿床工业类型繁多，世界目前勘查和开采的铅锌矿床主要类型有：①喷气沉积型矿床（SEDEX）：这类矿床是世界上铅锌的主要来源之一，为最重要的矿床勘查类型；②密西西比河谷型矿床（MVT）；③火山成因块状硫化物矿床（VMS）：这类矿床在铜矿中称为黄铁矿型铜多金属矿床或黑矿型矿床；④砂岩型铅锌矿床：此类型在法国和瑞典均有产出，有人认为中国云南的金顶超大型铅锌矿床也属此类型。除上述 4 类外，还有沉积变质型如朝鲜检德铅锌矿床，它是世界上已知最大的铅锌矿床以及夕卡岩型、热液交代型、脉型和斑岩型矿床等。此外，还有浅生富集或红土化作用形成的锌矿床。当前在国际上越来越重视对易采价廉的氧化矿-菱锌矿的开发利用。

上述 4 个类型铅锌矿床前 3 类在我国都有产出，而且矿床规模较大，区带分布明显，是我国铅锌资源主要开发和进一步勘查对象。它们的重要性和典型代表依次是：SEDEX 型（厂坝、东升庙等）；MVT 型（凡口、大梁子等）和 VMS 型（小铁山、呷村等）。至于我国最大的铅锌矿床，即云南金顶铅锌矿床的类型归属尚存在较大的争议，或属 SEDEX 型，或属砂岩型，或为一独特类型（暂可称之为金顶型）。今后，在勘查部署上，应在我国中西部地区，加大规模大、品位富、经济价值巨大的 SEDEX 型以及金顶式和 VMS 型等铅锌矿床

的找矿力度。近20年来世界所发现的大型、巨型矿床基本上都是SEDEX型。国内外均很重视这一类型矿床。

3）铝

铝的产量和消费量在金属中位居第二，仅次于铁。世界铝土矿资源丰富，储量充足，且还在不断增长。据美国地质调查局统计，1998年世界铝土矿储量为250×10^8 t，储量基础为340×10^8 t。其静态保证年限为205年和50年，而且其储量仅占资源量的30%～42%，铝土矿还有大量待勘查的资源。世界各国对铝土矿矿床的分类很不统一，按其下伏基岩性质大致分为两大类型-硅酸盐岩上的红土型和碳酸盐岩上的岩溶型铝土矿矿床。另外，较次要的还有陆源岩层之上的沉积铝土矿矿床，也称为齐赫文型铝土矿矿床。

（1）红土型铝土矿矿床。它主要是由酸性、中性和基性成分的含铝硅酸盐岩石在热带和亚热带气候条件下经深度化学风化形成的红土矿床，特别是新生代热带地区的红土矿床工业价值很大。据原苏联学者统计，此类矿床占世界现有储量86%，占世界铝土矿产量65%，大于10×10^8 t的6大红土型铝土矿区是在澳大利亚、几内亚、巴西、喀麦隆、越南和印度。澳大利亚的韦帕矿床是这类矿床的典型代表。

（2）岩溶型铝土矿矿床。这类矿床一般覆盖在石灰岩和白云岩凹凸不平的岩溶化表面。矿床和基岩之间为不整合或假整合。这类矿床加上陆源岩层之上的沉积铝土矿矿床的产量占世界总产量的35%，其储量占世界铝土矿总储量14%，主要分布于南欧和加勒比地区。我国的大部分铝土矿矿床属于这一类型，牙买加的铝土矿床为此类矿床的典型代表。

（3）沉积型铝土矿矿床。这类矿床一般呈不整合覆盖在不同的铝硅酸盐岩石的表面，与下伏岩石没有直接的成因关系，成矿物质是从其它地方搬运来的。这类矿床只占世界总储量不到1%，工业意义不大。

4）镍

世界镍资源非常丰富，储量充足。据美国地质调查局统计，1998年世界镍储量为4000×10^4 t，储量基础为14000×10^4 t，平均含镍接近（或大于）1%的矿床查明资源为1.3×10^8 t，其中60%产于红土型矿床，40%产于硫化物矿床，还有大量较低品位镍矿床的资源量。世界镍资源分布极不均匀，主要集中在古巴、加拿大、俄罗斯、新喀里多尼亚、印尼、南非、澳大利亚等国，它们占世界镍总储量的92%。另外，海底锰结核和锰结壳中还有大量镍资源，主要分布于太平洋洋底。目前勘查和开采的主要类型为硫化镍型和红土型。从开采量看以硫化物镍矿占多数。

（1）岩浆硫化铜镍矿床。这类矿床在空间上和成因上与基性和超基性岩（包括成分相似的喷出岩）有关，按照成矿环境主要可分为3种类型：①前寒武纪绿岩型矿床，该类矿床的基本特征是矿床均产于前寒武纪绿岩带内，含矿岩体与科马提岩套或镁铁质岩系紧密伴生。根据岩体的岩石类型和侵位方式可细分为与科马提岩套有关的或与拉斑玄武岩有关的两类矿床。②与大陆裂谷作用有关的矿床，该类矿床的成矿构造环境为克拉通内的裂谷及克拉通之间或边缘的活动带。根据岩体类型和成矿背景可细分为与溢流玄武岩有关的侵入体内的矿床和大型层状侵入杂岩体中的矿床两类。加拿大萨德伯里硫化铜镍矿床的成矿地质背景和矿床特点类似于大型层状侵入体矿床，对该矿床成因观点看法不一，大多数研究者认为是岩浆熔离型，还有不少人认为岩体属陨石冲击成因。该矿床储量巨大，镍品位高，被认为是一种特殊类型。③显生宙造山带内与基性-超基性侵入体有关的矿床，这类矿

床分布很广，但成大矿的不多。

(2) 红土型镍矿床（包括硅酸镍矿床在内）。这类矿床是含镍超基性岩（主要是纯橄岩、橄榄岩、辉石岩或蛇纹岩）裸露地表，在长期风化和侵蚀作用过程中高含量镍的富集的结果。气候条件对此类矿床形成很重要，最富的矿床见于亚热带气候区。世界最重要的红土型镍矿床是在新喀里多尼亚，该处蛇纹石化橄榄岩分布广泛，矿床规模大，品位高，埋藏浅，品位稳定，适于露采，已有一百多年的开采历史。

世界现有镍储量至少已可维持21世纪前半个世纪的生产，储量基础可保证整个21世纪镍矿山的生产，现有镍储量占储量基础的43%，占资源量的36%，说明资源的勘查程度不算很高，还有大量资源有待探明。近年加拿大在萨德伯里老矿区深部继续有大的发现。科特迪瓦在已知的锡皮卢矿床附近继续勘查，查明大的红土镍矿床，已查明矿石资源 5.4×10^8 t。此外，在西澳大利亚和坦桑尼亚均有新的发现，另外还有大量镍品位小于1%的低品位镍资源，以及海底锰结核和锰结壳中的镍资源，这使世界镍储量基础不断增多，提高了镍资源的保证程度。

5) 钴

据美国地质调查局统计，1998年世界钴储量为 430×10^4 t，储量基础为 950×10^4 t，世界钴储量高度集中于刚果、古巴、赞比亚、澳大利亚、新喀里多尼亚和俄罗斯等国家和地区。钴主要作为开采铜和镍等有色金属的副产品回收，其产量取决于这些金属的开采量。扎伊尔和赞比亚的钴产量占世界总产量的65%～70%。陆地上钴极少单独成矿床，绝大部分伴生在其它矿床中，因此钴矿床的分类主要取决于钴所赋存的矿床类型，可将矿床划分为如下7个类型：

(1) 铜钴矿床。主要分布于扎伊尔南部、赞比亚北部，属中非含铜页岩带范围，是目前世界钴的主要来源。值得注意的是，80年代初在加拿大发现这类矿床。另外在秘鲁南部也找到了一个有远景的铜钴矿床。

(2) 含钴硫化铜镍矿床。这类矿床大多数都含有少量钴，主要分布于加拿大、原苏联和澳大利亚。最著名的加拿大萨德伯里含钴铜镍矿床矿石储量为 3×10^8 t，平均含钴0.07%，每年大约从中生产2000 t钴。

(3) 含钴红土型镍矿床。这类矿床属超基性岩体裸露地表经长期强烈的风化和侵蚀作用形成富含铁、镍、钴的红土。钴的巨大储量集中在红土风化壳矿床中。矿床品位的高低，主要取决于风化作用的程度。

(4) 含钴多金属矿脉。这类矿脉世界各地都有发现，规模较大的有摩洛哥的布阿泽尔，加拿大科博尔特（安大略）和大熊湖和原苏联的霍伍阿克塞钴矿床等。此外，芬兰、印度、加拿大和澳大利亚的火山沉积岩中的金钴铀、铀镍钴钼和镍钴银铋矿化产钴，并伴随铀矿化产出。

(5) 含钴黄铁矿矿床。含钴量高的含铜黄铁矿型矿床在世界上罕见，其典型实例是原苏联中乌拉尔的佩什明-克柳切夫矿床，芬兰的奥托昆普矿床和美国爱达荷州艾恩河的无名(no-name) 矿床等。

(6) 含钴夕卡岩铁矿床。这类矿床主要是夕卡岩磁铁矿矿床，虽然钴在这类矿床中为铁矿的副产品，每年仅提供世界钴产量的1%～2%，但在美国却是钴的重要来源。

(7) 含钴铅锌矿床。具有独立钴矿物的铅锌矿床极为罕见。含有分散状钴的铅锌矿床

分布很广，但钴含量一般不高。国外某些矿床的钴已被回收利用，主要是从闪锌矿精矿中顺便回收钴。

总之，目前世界钴矿生产中起主要作用的是中非的铜钴矿床以及加拿大、原苏联、澳大利亚等地的含钴硫化铜镍矿床。红土型镍矿床虽然钴储量较大，但产量少，仅为潜力很大的钴资源。其余各类矿床居次要地位。世界镍资源丰富，储量充足，现有镍储量和储量基础静态保证年限分别为 141 年和 310 年。此外，海底还有丰富的钴资源，赋存在锰结核和锰结壳内。据估算，太平洋几个海域中潜在钴资源量总计约 1020×10^4 t，表明海底蕴藏有巨大的潜在钴资源。

6）钨

据美国地质调查局统计，1998 年世界钨储量为 200×10^4 t，储量基础 320×10^4 t，主要集中在中国、俄罗斯、加拿大和美国。世界勘查和开采的主要钨矿床类型有：

（1）夕卡岩型白钨矿床。根据矿床的主要成分可细分为夕卡岩型钼钨、铜钨、锡钨和钨矿床。夕卡岩型白钨矿矿床是目前世界上最重要的钨矿类型，其储量约占世界总储量的 1/2，往往形成大型矿区，如中国的湖南柿竹园钨矿床。

（2）石英脉型黑钨矿床。它可划分为石英大脉型和细脉带型矿床。就其形成温度还可划分为高、中和低温热液矿床。热液型大型钨矿床主要分布在中国南方的江西、广东、湖南和广西等省区。热液型石英脉黑钨矿矿床是当前世界上生产黑钨矿的主要类型，其储量约占钨矿总储量的 1/4 左右，如中国江西西华山和大吉山等钨矿床。

（3）斑岩型钨矿床。它与某些斑岩铜矿类似。根据成分可将这类矿床划分为斑岩钼钨矿床和斑岩钨矿床，前者如美国的克莱梅克斯矿床，后者如加拿大的普莱曾特山矿床。斑岩钨矿床品位低（0.1%左右），储量大，约占钨矿总储量的 1/4，矿石矿物中黑钨矿和白钨矿几乎各占一半，如中国江西杨储岭钨矿床。

（4）层控型钨矿床。此类矿床罕见，东阿尔卑斯山伦纳尔塔尔和费贝塔尔的层控矿床属此类型。中国江西上饶焦里白钨矿床亦属此类型（盛继福，1994）。

世界钨资源较丰富，1994 年世界钨储量和储量基础静态保证年限分别为 57 年和 86 年，现有储量至少能保证 21 世纪前半个世纪世界钨的生产。但全球资源分布不平衡，中国占世界总储量 40%左右，占国际市场供应量 60%左右。因此，中国控制了世界钨的生产与销售。中国江西黑钨矿、湖南白钨矿和秦岭将成为重要钨矿基地。未来世界钨业发展前景将很大程度上取决于中国的钨的出口政策。

7）锡

据美国地质调查局资料，1998 年世界锡储量和储量基础分别为 770×10^4 t 和 1200×10^4 t。世界锡资源分布相对集中，太平洋沿岸地区占 3/4 以上，尤以东南亚地区的矿化区更为重要，锡的储量分布相对集中，中国、巴西、马来西亚、印度尼西亚、泰国、扎伊尔、玻利维亚、俄罗斯和秘鲁等国就占世界锡储量的 99%以上。锡的成矿条件多样，形成多种类型矿床。目前已开采的锡矿床有：

（1）热液型矿床。按矿物成分可分为：①锡石-石英脉矿床，产于花岗岩岩基附近，矿床规模以中小型为主，也见有大型和特大型矿床，矿石品位高。这类矿床的锡储量约占原生矿床锡储量的 50%左右。主要分布于东南亚和欧洲，是形成砂锡矿床最主要的物质来源。②锡石-硫化物矿床，常与偏基性花岗岩类岩体、中性和基性岩墙带有关，矿床规模多为大

中型，少数为特大型。这类矿床主要分布于中国、玻利维亚和原苏联的东部沿海区。其锡储量约占原生矿锡储量的 40%。80 年代加拿大发现东肯普特维尔大型锡矿床，它将成为北美第一个原生锡矿矿山。

(2) 伟晶岩型矿床。矿体呈脉状产于花岗岩体及其附近的断裂中。形成时代从寒武纪到第三纪，但最具经济意义的产于前寒武纪地区。这类矿床的锡储量约占原生矿床锡储量的 9%左右。主要分布于非洲、巴西、澳大利亚西部等地。

(3) 砂矿床。目前开采的主要为冲积砂矿和海滨砂矿。这类矿床主要分布于东南亚、中南非、西澳大利亚等地。砂矿床储量占国外锡储量的 64%，产量占锡总产量的 60%～70%。典型矿床有马来西亚的近打河谷砂矿。80 年代在巴西亚马孙州发现皮廷加大型含稀散金属的锡矿床，主要开采冲积矿床和部分残积矿床，是一世界级大锡矿。该矿的发现使巴西锡矿储量增加了两倍，除锡之外还有丰富的铪、铌、钽和钇等资源。

世界锡资源充足，现有储量和储量基础静态保证年限分别为 36 年和 52 年，可见全球锡资源的保证程度是较高的，足以维持世界 21 世纪头 30 年的生产。人们通过大量研究发现，锡矿化仅与一定特征的花岗岩有关。所以含锡花岗岩研究是了解锡成矿作用和找矿的关键。

8）钼

据美国地质调查局统计，1998 年世界储量和储量基础各为 550×10^4 t 和 1200×10^4 t。钼资源高度集中在北、南美洲科迪勒拉山系和中国东秦岭和燕辽地区。储量最多的国家有美国、中国、加拿大、智利和俄罗斯等，占储量 85%左右，尤其美国独占储量基础 45%。世界钼矿床按地质成因可划分为以下类型：

(1) 斑岩型钼矿床。这类矿床的经济意义最大，占世界钼储量和钼产量的 80%以上。斑岩型钼矿床的共同特点是矿化呈细（网）脉浸染状，矿床规模大、品位低，适宜露天开采。按金属成分可分为独立的斑岩型钼矿床和铜-钼矿床两个亚类。斑岩型矿床是钼的重要来源。在西方国家中其储量和产量分别占 31.2%和 29.6%。世界上著名的特大型钼矿床有美国的克莱梅克斯、亨德森、石英山，中国陕西的金堆城、兰家沟，加拿大的恩达科、基特索尔特等。斑岩型铜钼矿床是钼的另一重要来源，钼作为副产品回收。

(2) 斑岩-夕卡岩型钼（钨或铁）矿床。这类矿床与花岗斑岩或似斑状花岗岩有空间和成因上的联系。花岗岩类侵入体与铝硅酸盐层相接触，分别产生角岩化和夕卡岩化，成矿热液活动导致矿化叠加在花岗岩类岩体、角岩和夕卡岩之上而形成本类型钼矿床。这一类型在中国不但较广泛产出，且有重要工业意义，如河南栾川南泥湖-三道庄钼（钨）矿床和上房沟钼（铁）矿床等。

(3) 夕卡岩型钼矿床。这类钼矿床在空间上和成因上与花岗岩类侵入体有关。按矿石矿物成分有夕卡岩型铜钼和钼钨两类矿床。此类矿床主要分布在原苏联和中国，如俄罗斯北高加索的特而内奥兹钨钼矿床。

(4) 碳酸岩脉型钼（铅）矿床。与碳酸岩有关的钼、稀土矿化曾见于原苏联东西伯利亚和科拉半岛地区，但未构成以钼为主的矿床，只有中国陕西黄龙铺大型钼（铅）矿床是这一类型的代表。矿体由含钼（铅）石英-方解石碳酸岩脉组成。其矿石物质成分和辉钼矿富含铼，明显不同于其他类型以钼为主的矿床。

(5) 石英脉型钼矿床。这类矿床与花岗岩侵入体有成因联系，属高-中温热液矿床。矿

床规模不大。常与钨矿床伴生，钼往往作为钨矿山的副产品回收。

(6) 沉积型钼矿床。目前已知黑色页岩中有钼、镍、钒、铀或铂族元素矿化，如在中国南方诸省的下寒武统黑色页岩普遍发育富含钼、镍或钼、铀矿化。这一类型钼矿是一种潜在的钼矿资源。

世界钼矿床的成矿时代大多集中在中生代至新生代早期，与该时代构造岩浆作用有关，中生代—新生代是最重要的钼矿成矿时代，其次是海西期。世界主要钼矿床的分布可划分出 3 个全球性成矿带，即环太平洋成矿带、地中海阿尔卑斯成矿带和乌拉尔-蒙古钼矿成矿带。世界钼资源丰富，现有储量和储量基础静态保证年限分别为 39 年和 85 年，可供全球 21 世纪前半个世纪的开采。中国是世界第 2 大钼资源国，集中分布在陕西、河南、吉林、辽宁和山东等省。

9）汞

据美国地质调查局统计，1998 年世界汞的探明储量为 12×10^4 t，储量基础为 24×10^4 t，汞矿产出较多的有西班牙、意大利、吉尔吉斯斯坦、墨西哥等国。世界已查明的汞资源约有 60×10^4 t，地中海（沿岸）-中亚构造成矿带是世界汞矿床最集中的产地，占世界 70% 的储量和储量基础。其次为环太平洋构造成矿带。从地质构造上看，这两个带都是古生代和新生代的构造活动带。世界汞矿床的成矿时代较新，绝大多数是阿尔卑斯的，还有一些，如意大利的芒特阿米亚特矿床及热泉型矿床，均属第四纪。

目前世界所提出的汞矿床分类方案不一致。根据矿体形态、成矿元素组合、热液活动特点，并结合地质生产的实用性可将汞矿床划分为如下 4 类：①热液层状汞矿床，这类矿床最为重要，是世界汞储量和产量的首要来源。世界著名的大型和巨型矿床，如美国的新阿尔马登、新伊德里亚矿床和乌克兰的尼基托夫矿床均属于这类矿床。②热液层状汞锑矿床，矿床的规模一般不大，但在中亚地区却具有重要意义。③热液脉状汞矿床，矿床规模以中小型为主。④热泉型汞锑矿床，矿床规模不大，储量不多，仅具有一定的成因意义。汞矿床的工业类型主要有 2 种：①与岩浆作用关系不明的低温热液汞矿，它们多分布在大范围内无火成岩出露的地区，常形成规模很大的（往往达到大型和超大型）层状、似层状矿体；②与火山作用关系密切的浅成低温热液矿床，它们常与第三纪甚至近代火山及温泉活动有关。

10）锑

据美国地质调查局统计，1998 年世界锑储量为 210×10^4 t，储量基础为 320×10^4 t，世界主要查明锑资源约 510×10^4 t，现有储量可保证世界 21 世纪前半个世纪的生产与需求。世界锑资源分布极不平衡，它高度集中在中国，是世界上最大的锑资源国，锑储量和储量基础分别占世界总量的 37.5% 和 52.8%，因此，中国锑资源开发政策将对世界锑资源保证程度起举足轻重的作用。中国有上百处锑矿产地，已开发利用的有 60 多处，集中分布在湖南、广西和云南三省，其次为玻利维亚、原苏联、泰国和南非等国，在这些产地中，中国锑矿勘查程度最高，开发条件最好。世界已知锑矿床绝大部分集中在全球性的 3 个成矿带中，即环太平洋成矿带（世界 77% 的锑储量，经济意义最大）、地中海成矿带和亚洲大陆东西矿带中。工业锑矿床的形成主要是与各种成因（包括深成、火山及非岩浆成因）的热液活动有关。因此锑矿床的成因类型均属热液型，具经济价值的锑矿床主要为中、低温热液型，呈脉状的锑和金-锑矿床以及呈层状的锑和汞-锑矿床。

（1）热液层状锑矿床。这是最重要的工业类型，锑储量约占世界总储量的50%以上，提供了世界60%以上的锑矿山产量。这类矿床主要分布在中国，其次是中亚、地中海沿岸等地区。矿床一般远离侵入体而产在大断层附近，并受一定地层层位和岩性的控制；含矿地层主要是碳酸盐地层，少数为火山-沉积地层。矿床规模以大中型为主，按矿物组合可分为单锑型（如锡矿山、扎亚查）和锑汞型（吉日克鲁特等）。

（2）热液脉状锑矿床。这类矿床分布较广泛，规模以中小型为主，也有大型矿床。锑储量约占世界总储量的40%以上，产量约占世界总产量的1/3，因此也是锑矿床的主要类型。脉状锑矿床主要产在中、新生代的褶皱断裂带和古老地块内的活动性断裂构造中。按成分可分为锑金型、锑钨金型、锑汞型和锑多金属矿床等4个亚类。

11）铋

据美国地质调查局统计，1998年世界铋储量为11×10^4 t，储量基础为26×10^4 t。铋极少单独成矿，一般都同铅、锌、铜、钼、钴、金、锡、银和钨等伴生。玻利维亚有一个可单独开采的铋矿床，矿石中铋含量高达40%，中国也有独立铋矿床。铋大多数是在处理铅、铜、金、银、钴、镍及钨等矿石过程中综合提取的，主要是作为铅和铜的副产品回收。因此其产量受主金属产量、消费量的控制，而对需求的反应不敏感。世界主要产铋国是中国、秘鲁、墨西哥、日本和澳大利亚。中国生产的铋大部分是钨矿的副产品；日本生产的铋主要是铅的副产品；秘鲁从铜、铅、银矿中提取铋；澳大利亚的铋大都来自铅锌银矿和铜矿山；墨西哥的铋多来自铅和铜矿；加拿大的铋取自钼、铅锌和铜矿石；美国最重要的来源是铅锌银交代矿床；玻利维亚从铜和锡矿石中提取铋。值得注意的是，中国是一个铋资源大国，铋产量逐年增加，1985年，中国铋产量仅占世界产量的6%，1990年增长到26%，跃居为世界第一位。从此，中国铋产量约占世界的1/4左右。中国作为一个铋的生产和出口大国对世界铋市场的供需平衡起着重要作用，随着工业生产的发展，国内对铋的需求大幅度增加以及钨产量大幅度减少，作为其副产品的铋大幅度减少，中国铋的出口量将大幅度减少，这将使国际铋市场供过于求状况得到缓解。

2.2.5 贵金属矿产

1）金

世界各国十分重视金矿的勘查和开发。世界黄金资源分布广泛，但不平衡。美国地质调查局统计，到1998年底黄金储量45000 t和储量基础72000 t（不包括中国和其他一些没有公开数据的国家），储量较大的国家有南非、原苏联、美国、加拿大、澳大利亚、巴西等资源大国。其中南非约占世界黄金资源量的一半，占世界黄金储量基础的48%，巴西、原苏联和美国各约占资源总量的12%。

金矿可形成于各个地质时期和各种地质构造环境及岩石类型中。原生金矿类型多，勘查和开采原生金矿的主要类型有：①前寒武纪地盾、地台区绿岩带金矿，包括加拿大赫姆洛金矿、美国霍姆斯塔克金矿；②元古宙原始地槽坳陷区含金-铀砾岩型金矿，包括南非维特瓦特斯兰德金矿；③古生代褶皱区的美国卡林型金矿和乌兹别克斯坦穆龙套型金矿；④中、新生代与火山岩和次火山岩、小侵入体有关的金矿，包括巴布亚新几内亚的波尔盖拉和利希尔岛金矿、菲律宾阿库潘-安塔莫凯金矿、日本菱刈金矿等；⑤现代砂金矿床和⑥伴生金矿。其中1和2类集中在前寒武纪，占世界金储量的70%；4类集中在中、新生代，约占世界金储量的25%；3类在古生代地层中的金矿约占5%。可见，世界金储量集中在“一

老一新”是明显的。

80年代以来全球性找金活动达到前所未有的热度，发现了一大批大型和特大型金矿。尤其是美国、加拿大、澳大利亚、巴西、日本和巴布亚新几内亚等国在金矿的找矿和勘查中取得了重大突破和进展。如：①美国加利福尼亚州麦克劳林金矿床发现于1981年，金储量100 t，平均品位4.98 g/t。矿床为产于火山岩和沉积岩中的网脉浸染型金矿床，矿体产于硅化凝灰岩中。②美国卡林金矿带在72 km范围内有21个金矿床，截至1988年底总可采储量达1026 t，以金坑（319 t）和波斯特-贝茨矿床（551 t）为最大。卡林金矿带原勘探深度在100～300 m以内，均属低品位沉积岩容矿的微细浸染型金矿。卡林金矿带自1987年执行深钻计划以来找矿成果卓著，先后在矿区深部发现一系列高品位大型金矿床。近年来，又在深度450 m以下发现了“高沙漠”金矿（60 t，品位10.3～20.6 g/t）和“绿松石”金矿（155 t，品位12 g/t）。可见，卡林金矿带深部找矿仍有巨大的潜力。③加拿大安大略省赫姆洛金矿床于1982年发现，储量597 t，品位7.78 g/t，属太古宙绿岩带中层控浸染型矿床。④加拿大西北地区通德拉金矿床位于耶洛奈夫东北240 km处，1982年发现，储量150 t，品位6.20 g/t。矿床产于太古宙火山岩带的陡倾长英质火山碎屑岩中，受剪切构造控制。⑤日本九州菱刈金矿床于1980年发现，储量120 t，品位80 g/t，加上在其旁侧发现的山田和山神金矿床，总储量约260 t，平均品位接近70 g/t，属第三纪浅成热液石英脉型或热泉型。近年在该矿区又发现一条举世罕见的特大型含金矿脉，储量40～50 t，品位20～25 g/t。⑥巴布亚新几内亚恩加省波尔盖拉金矿床由70年代以前的一个小型金矿床（储量仅几吨）至90年代剧增为特大矿，储量420 t，品位3.7 g/t，其矿化与中新世闪长岩成分的浅成斑岩侵入体有关。⑦巴布亚新几内亚火山岩型亚利希尔金矿床（573 t，品位3.4 g/t）。⑧前捷克斯洛伐克绿岩型塞利纳-莫克尔金矿区。⑨巴西巴拉州砂金矿下部风化岩石中的佩达拉金矿床。80年代以来新发现的特大型金矿床还有：智利马里昆加浅成热液金矿-斑岩金矿带的雷富希奥（可采储量103 t）、拉科伊帕（126 t）等金矿床，整个矿带金的地质储量已超过四五百吨；美国阿拉斯加州诺克斯堡斑岩型铜金矿床（Au>124 t）；环太平洋火山岩区斑岩型铜金矿和火山岩型金矿的找矿也有巨大进展，如印度尼西亚的格拉斯贝格夕卡岩-斑岩型铜金矿床（1200 t，品位1.8 g/t）、巴图希贾乌斑岩型金矿；菲律宾发现迪比迪奥斑岩型金矿；澳大利亚发现卡迪亚斑岩型金矿；智利发现塞罗卡塞尔和帕斯夸斑岩型金矿；秘鲁和厄瓜多尔各发现了波里纳和加比斑岩型金矿；美国发现了朱诺和诺克斯堡斑岩型金矿，还有麦克唐纳火山岩型金矿等。目前，环太平洋火山岩区还在继续工作和发展中。原苏联雅库特的涅日达宁（475 t，品位5 g/t）；马丹加的迈斯科耶金矿（277 t，品位12 g/t）；吉尔吉斯斯坦的库姆托尔金矿（316 t，品位4.4 g/t），堪察加的阿梅季斯特金矿（96 t，品位16 g/t）等。另外，近年来有些著名老金矿区金储量有明显扩大，如南非兰德金矿区新查明几个储量为几百吨的金矿床，在该盆地深部发现了大型含金古砾岩型金矿床；多米尼加“老村庄”金矿储量已扩大到600 t以上。90年代以来，老地层中的金矿以及红土型金矿也有大的发现，坦桑尼亚和委内瑞拉等在太古宙绿岩带，马里、尼日尔等在早元古代绿岩带中均发现了大型金矿床；俄罗斯发现了特大型前寒武纪黑色页岩型金（铂）矿床；委内瑞拉1991年在绿岩带地层分布区发现一大型红土型金矿床（390 t，品位1.25 g/t）（古

方，1994[1] 和何金祥，1998[2])。

此期间中国的金矿勘查工作发展迅速，取得了建国以来最辉煌的成就。发现和探明了一批大型金矿。值得注意的是，在黔西南的二叠系、三叠系中发现了很有前景的微细浸染型金矿，形成"黔西南金矿成矿远景区"，被誉为滇黔桂"金三角"，成为中国新的黄金基地。此后，在四川、甘肃、陕西、宁夏等省（区）都相继发现了该类型金矿，又找到一个陕甘川新的"金三角"区，进一步拓宽了找金领域。此外，胶东和小秦岭地区老金矿区、带，又发现一批新的矿床，如胶东台上超大型金矿，在广东省云开地区找到了焦家式破碎带蚀变岩型金矿——河台金矿，在海南省找到抱板等一系列金矿，近来又找到石英脉型富金矿——抱伦金矿。还发现了一些新类型金矿，如：山东省发现花岗岩型（斑岩型?）金矿；内蒙古发现钾长花岗岩脉型金矿；安徽省新桥发现铁帽型金矿。近十多年的重大进展，在矿床类型上主要是继续发现绿岩带型金矿新矿床和扩大储量；找到了一批剪切带型大型金矿；微细浸染型（卡林型）金矿的找矿取得了重大突破。

从中国金矿类型看，应着重抓浅成低温热液型（火山-次火山岩型）、微细浸染型（卡林型）、蚀变岩型和绿岩型金矿的找矿。在强调寻找独立金矿的同时，还需要重视寻找含金多金属矿床，此外应特别重视构造的研究和分析。

世界黄金资源丰富，分布广泛，其储量和储量基础分别占总资源量的58%和80%，而储量占储量基础的73%，说明金矿勘查程度较高。但储量和储量基础静态保证年限分别为21年和29年，只能保证21世纪头20年的生产。不过70年代以来的找金热还在继续，80年代以来发现不少大金矿，全球金矿的资源潜力仍较大，尤其是西南太平洋地区和拉美各国，黄金勘查前景可观，储量将不断增多，保证程度也会进一步提高。

(2) 银

据美国地质调查局统计，1998年世界银储量和储量基础分别为28×10^4 t和42×10^4 t。银矿分布广泛，储量主要集中在墨西哥、加拿大、美国、澳大利亚、秘鲁等国，它们占世界总储量的57%。世界银资源约有2/3来自铜、铅-锌、金等有色金属和贵金属矿床中，1/3以产银为主的脉型矿床。虽然最新发现是原生金、银矿床，但巨大的未来储量和资源预计仍来自副产银的贱金属矿床的发现。世界银资源主要分布在3个巨型含银构造带中，即环太平洋带、地中海带和蒙古-鄂霍次克带。银成矿区的分布具规律性，它们都产于大洋—大陆过渡型成矿系统中；中—新生代褶皱带的主要银成矿区也都与大洋和大陆含矿构造的结合部位有关。最大的过渡型成矿系统的银矿化时代为渐新世—中新世。第二个过渡型成矿系统为在大西洋和北冰洋中脊裂谷带及相邻褶皱带的白垩纪—老第三纪的银多金属成矿区。银的主要矿床类型有：①与中—新生代火山岩、次火山岩有关的浅成热液矿床；②中温热液银-有色金属矿床；③中温热液银-钴-镍矿床；④碳酸盐中的交代型银矿床等。

根据容矿岩石和主要有用元素组合划分的主要银矿床类型有：①陆相火山岩、次火山岩容矿的银矿床；②海相钙-碱性火山岩和火山沉积岩容矿的含银硫化物矿床；③碳酸盐岩、夕卡岩容矿的银铅锌交代矿床；④变质岩、碎屑沉积岩容矿的银铅锌矿床；⑤前寒武纪变

---

[1] 古方. 1994. 我国金矿找矿突破的可能途径和对策研究. 见：戴自希，吴智慧，李树枝等. 1994. 地质矿产信息研究成果（29）——我国急缺矿产找矿突破的途径和对策，北京：中国地质矿产信息研究院，101～129.

[2] 何金祥. 1998. 九十年代世界固体矿产勘查重大进展及展望. 见：中国地质矿产信息研究院. 跨世纪的地学态势——调查与科技.《二十一世纪初地质科技与地矿工作走向与对策研究》成果之三，地质矿产信息研究成果（93）.

质火山岩、沉积岩、辉绿岩容矿的银钴镍铋砷脉状矿床；⑥砂页岩容矿的同生沉积矿床。由于银矿多与其他金属矿床共生，所以各种金矿、铅锌矿、铜矿勘查的成矿理论、矿床模式以及地质和物化探方法均可用于相应类型的银矿勘查。找矿应根据各地区的地质构造环境、容矿岩石、矿化类型特点综合考虑，合理选择相应的勘查方法。

按赋矿岩石不同及金属组合的差异，白鸽等（1994）提出中国银矿床可分为 8 大类 29 个亚类，以产于火山岩系接触蚀变岩系和构造破碎蚀变岩系最为重要。主要分布在地台边缘、褶皱系，特别是滨太平洋构造岩浆活化区。成矿时代以中生代和元古宙为主。独立银矿床和银金共生矿床以陆相火山岩和构造破碎蚀变岩型居多。与成矿有关的海相火山岩系多属细碧角斑岩系，陆相火山岩和侵入岩主要是中酸性钙碱性岩石。银的矿源层及赋矿地层以元古宙和古生界为主。银矿的迁移、就位多受构造控制，合理运用综合找矿方法是多快好省找银的有效手段。

中国近十多年来加速了银矿的找矿、勘查和开发，已成为世界主要银资源国，银矿成矿地质条件良好，资源远景可观。世界银资源虽然丰富，但以伴生矿床为主，其开采利用受限。现有储量和储量基础静态保证年限分别为 20 年和 30 年，可见，储量的保证程度不高，因此必须加强勘查，尤其是加强寻找以银为主产品的独立银矿床。

3）铂族金属

据美国地质调查局统计，1998 年铂族金属储量和储量基础为 70600 t 和 77500 t，其分布高度集中在南非、俄罗斯、加拿大和美国，占世界总储量的 98%。在铂族金属中，铂和钯的产量约占 90%，其余金属约占 10%。占世界总储量绝大部分的铂族金属勘探和开采的主要矿床类型有：

（1）与基性-超基性岩有关的硫化铜镍矿型铂族金属矿床。这类矿床是世界铂族金属储量和产量的最主要来源。当前世界三大产铂国家的铂族金属主要来源于此类矿床，其代表性的矿床有：南非布什维尔德杂岩体铜镍硫化物-铂族金属矿床（铂族金属是主产品，铜、镍、钴和其他金属为副产品）；原苏联诺里尔斯克含铂族金属铜-镍硫化物矿床和加拿大萨德伯里含铂族金属铜镍硫化物矿床。

（2）与基性-超基性岩有关的铬铁矿型铂族金属矿床。这类矿床的重要性日益增大，80 年代初在南非布什维尔德杂岩体中查明了与 UG-2 铬铁矿层有关的铂族金属矿床，使南非铂族金属储量几乎增加了一倍。该含铂层主产铂族金属，铬铁矿作为副产品回收。此外，原苏联乌拉尔、埃塞俄比亚和美国阿拉斯加等地的铂矿床亦属此类型。

（3）砂铂矿床。砂铂矿床与其他矿产的砂矿床区别不大。有残积、坡积和冲积砂铂矿床。分布在哥伦比亚、美国、加拿大和原苏联。此类矿床属次要类型，其储量只占世界总储量的百分之几，其作用逐渐减少。

（4）其他类型。除上述类型外，还发现下述 6 种类型含铂族金属的矿床：①含铂黑色页岩铜矿床（如波兰蔡希斯坦铜矿床）；②产于各种铜、金矿脉中的铂矿床（如美国内华达州波斯矿床）；③含铂族金属斑岩型（浸染型）铜钼矿床（如美国的克莱梅克斯）；④含铂黄铜矿型铜矿床（如原苏联乌拉尔）；⑤含铂锡石-硫化物矿床（如原苏联远东的一些矿床）；⑥含铂铀-硫化物矿床（如加拿大安大略省）。

对铂族金属的勘查和研究重点是基性-超基性层状侵入体，在侵入的岩浆岩体中前寒武纪层状侵入体中的铂族金属具有极大的工业潜力。如南非布什维尔德、津巴布韦大岩墙的

大型层状岩体、美国蒙大拿州的斯提尔沃特等。除了层状岩体，铂族金属矿化还可能与属于其他建造的基性-超基性侵入体有关，其特点是具有多种成矿专属性（铜镍硫化物、铬铁矿、钛磁铁矿等）。近年来积极研究蛇绿岩带，特别是地中海的蛇绿岩带。无论在侵入岩还是火山岩中都发现了铂族元素的富集。在侵入的超基性岩石的硅酸盐相中发现了铂族金属。与前寒武纪绿岩带火山岩系中分异的超基性熔岩有关的科马提岩型富铱硫化镍矿床很有远景。在加拿大萨斯喀彻温省的元古宙沉积物中，发现了可作为铂族金属资源新来源地的铀金铂族金属矿石，硒锑铋是铂族元素异常的指示标志，有大量的铂族金属硒化物。某些热液型铀矿脉也富有铂族元素，故必须认真研究铀矿石成分中的铂族金属；铂族金属砂矿普查也是一项极为迫切的任务；将来尤其应注意铂族金属的新类型，即古代和现代海盆中的沉积物（镁质沉积物、铁锰结壳、高碳质页岩）和喷出岩（大陆区的橄榄粗玄岩和大洋区的玻质安山岩），例如要研究太平洋的铁镁沉积物，这种沉积物所含的铂族金属比类似的大陆沉积物高出 100 倍，钴结壳普遍含有铂。

值得强调的是，近几年发现的含重要的铂族金属矿化，其分布大部分与金矿化重合，如俄罗斯西伯利亚产在新元古代与黑色页岩有关的沉积岩系中的中温热液型特大型“干谷”金矿等，这种非传统金铂矿床在乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦和巴西等国均有出现。对于中国来说，也应注意与新元古代—早古生代黑色页岩有关的多种金属矿床，在原苏联东部地区发现了一些重要的甚至是世界级的大金矿床以及金铂矿床，在中国应注意研究成矿环境和控矿条件，创造性地推进此类矿床的找矿工作。

总之，世界铂族金属资源丰富，储量充足，保证程度高，按年产量平均 283 t 计，铂族金属储量和储量基础静态保证年限分别为 191 年和 223 年。但由于铂族金属已有储量高度集中，所以各国为保证供应，仍需进行不断的勘查。

2.2.6 稀有及稀土金属矿产

1）锂

锂作为最轻的亲石稀有元素，它在岩浆作用进程中通常富集在晚期残余岩浆内。可出现在多种类型的岩石中。此外，盐湖卤水、地热卤水、油田卤水都含有大量的锂。锂矿床按地质成因可划分为花岗伟晶岩型、盐湖卤水型、云英岩化花岗岩型和富锂粘土型 4 类。其中前 2 类是在目前工业技术条件下最有经济价值的锂矿床。

（1）花岗伟晶岩型锂矿床。这类矿床分布较广，主要产在古老结晶地盾、地块等相对稳定的地质构造单元中，成矿时代以前寒武纪为主，亦有海西期和燕山期的。含矿伟晶岩可分为：①带状构造伟晶岩锂矿床。该类矿床的矿物成分复杂，其中锂辉石是优质低铁锂精矿的主要来源。此类矿床按成分可细分为复合（铍锂铯钽）稀有金属伟晶岩矿床（如加拿大的伯尼克湖矿床、津巴布韦的比基塔矿床和纳米比亚的卡里比布矿床也是世界上最大的铯矿床，我国新疆可可托海特大型锂、铍、钽、稀有、云母矿床具有很好的分带性）和钽锡锂伟晶岩矿床（如澳大利亚的格林布希斯矿床也是一个大型钽矿床）两个亚类。②无带状构造伟晶岩矿床。这种伟晶岩体基本是单相均质岩体，这类锂矿床通常是独立的锂矿床，或者是伴有少量铍和钽的锂矿床。如美国北卡罗来纳州“锡石-锂辉石”带的金格斯山矿床和贝瑟默城矿床，加拿大的伯尼克湖和中国的江西、湖南、四川等许多伟晶岩矿床。

（2）盐湖卤水型锂矿床。这是锂矿床的重要类型，盐湖中锂资源占世界锂储量的 66% 和占世界锂储量基础的 80%以上。在封闭盆地中，特别是高原干旱地区的封闭盆地中，锂

可在盐湖卤水中发生富集并形成有开采价值的锂矿床，可综合提取Li、K、Na、Mg、Br、I。目前正在开发和生产的重要含锂盐湖有智利的阿塔卡马、阿根廷翁布雷穆埃尔托、美国"银峰"盐湖和中国青海柴达木盐湖等；还未开发的重要盐湖有玻利维亚乌龙尼和中国西藏的扎布耶盐湖等。

总的看来，全球锂资源极为丰富，据美国地质调查局统计，1998年全球已查明锂资源储量340×10^4 t，储量基础940×10^4 t，按1997年产量估计能保证世界各国生产309年。世界锂储量和储量基础比较集中在南美洲和北美洲，较多的国家有玻利维亚、智利、美国、加拿大、澳大利亚、津巴布韦等。其中玻利维亚和智利的储量基础约占世界89.3%，我国有较大的资源远景。

2）铍

铍是典型的亲石元素，在岩浆结晶作用过程中可置换Si^{4+}而进入多种硅酸盐矿物中。铍主要呈分散状态赋存在斜长石、白云母、霞石等造岩矿物中。在残余岩浆、高温气液及中温热液环境中，铍可发生富集并形成独立的铍矿物（绿柱石、羟硅铍石和硅铍石等），从而构成有工业意义的铍矿床。铍的成矿作用主要与酸性岩浆活动有关。其类型很多，大致可划分出5大类：

（1）含绿柱石伟晶岩型铍矿床。这类矿床分布广泛，按矿物组合可分为绿柱石-白云母伟晶岩和复合稀有金属伟晶岩两个亚类。前者广泛分布于巴西、印度、阿根廷和美国等地；后者分布在加拿大的伯尼克湖、阿根廷、津巴布韦的比基塔、纳米比亚的卡里比布、扎伊尔、马达加斯加、原苏联及中国的新疆阿勒泰地区等，矿床中含有锂钽铌铯等多种有益组分。绿柱石往往是作为锂矿床、铌钽矿床等复合稀有金属矿床的共产品和副产品被利用。

（2）含硅铍石碱性交代岩型铍矿床。这是80年代初在加拿大索尔湖稀有金属矿床中圈出铍矿体之后确立的新矿床类型。索尔湖正长岩体位于组成碱性杂岩体的一巨大花岗岩体内，在正长岩体和花岗岩体的接触带及正长岩体内发现有5个富含铌、钽、锆、钇、稀土元素和铍的矿化带。

（3）含羟硅铍石火山热液型铍矿床。在美国西部斯波山铍矿床和谢拉-布兰卡铍矿床以及墨西哥北部的阿瓜奇利铍矿床均属此类型。主要铍矿物为羟硅铍石。矿石中铍的分布极不规律。除铍之外还含有锂、铌、钽、锡、钼、镓、钇及钇族稀土元素。

（4）含绿柱石云英岩型矿床。这类矿床常与钨、钼、锡、铋等矿化伴生。按产出特征和矿物组合可划分为含绿柱石交代蚀变花岗岩矿床和含绿柱石石英脉矿床两个亚类，前者的工业意义较大，巴西的博阿维斯塔铍矿床可能属于此亚类；后者为含钨锡钼铍的复合矿床，绿柱石易选，具有一定工业意义。

（5）接触碳酸盐型铍矿床。这类矿床产在花岗岩体外接触带的接触碳酸盐内，包括含铍夕卡岩矿床和萤石-羟硅铍石层状矿床两个亚类。前者矿床规模较大，铍含量较高，但矿物颗粒细小难选。在美国新墨西哥州和阿拉斯加州已查明有此类矿床。后者矿层产在花岗岩体与地质构造极为复杂的沉积地层的接触带中，铍矿化叠加在夕卡岩之上。矿石易于用浮选法分选出羟硅铍石-硅铍石精矿和萤石精矿。

世界铍资源丰富，巴西是铍资源大国，印度第二，澳大利亚铍储量的一半以上集中在1985年基本探明的布罗克曼硅铍石稀有金属矿床中，加拿大的铍储量主要集中在西北地区索尔湖含硅铍石稀有金属矿床中，投入开采后将成为西方国家最大的铍矿山。美国的铍储

量主要集中在犹他州斯波山羟硅铍石矿床中。挪威1988年发现了据认为是欧洲第一个具有商业价值的独立铍矿床——赫格蒂夫矿床。可见铍资源充足，还不断有新的发现，按年产铍600 t计算，铍储量足够世界开采600年以上。

3）铌

据美国地质调查局统计，1998年世界铌储量350×10^4 t，储量基础420×10^4 t。其探明储量高度集中，90%以上分布在巴西，其次是加拿大、扎伊尔、尼日利亚等国。近年来，许多国家特别是非洲国家探明了大量可供开采的铌储量。世界铌储量保证程度高，可满足世界需求数百年。铌在自然界中几乎总是以氧化物形式与其他矿物共生，尤其是总与钽共生。铌矿床的主要工业类型有：

（1）碳酸岩风化壳型矿床。这是一种含矿程度很高的稀有金属矿床类型，其中稀有金属高度富集。在世界铌原料中占有重要地位，占铌资源量90%以上。根据风化壳的发育程度和阶段可将风化壳型矿床进一步分为3类：①水云母风化壳型矿床，如俄罗斯的别洛济米斯科耶矿床和巴西的安吉科矿床；②红土风化壳型矿床，如巴西的阿腊沙矿床和卡塔拉奥矿床；③后期表生蚀变风化壳型矿床，如俄罗斯的托姆托尔矿床。最后这一类矿床成矿过程较为复杂，成矿物质经历多次再生富集，易于形成高品位的大型稀有金属矿床。此类矿床主要产于巴西、澳大利亚、俄罗斯、加蓬，主要含铌矿物为烧绿石。

（2）含铌铁矿-钽铁矿的花岗岩及花岗伟晶岩矿床。这类矿床的铌储量在各类铌矿床中所占比例很小，约为1%。矿石主要铌钽矿物是铌铁矿-钽铁矿，常与锡石伴生，目前一般作为开采锡石的副产品回收。此类矿床产于非洲中南部的诸多国家，如尼日利亚北部的焦斯高原含铌铁矿花岗岩及其坡积、残积矿床。此外，巴西、马来西亚、泰国、莫桑比克和扎伊尔也有这类矿床。

（3）砂矿。含铌砂矿一般规模小，但砂矿易采易选，并常与钽铁矿、锡石等一起产出，因而具有一定的经济意义，主要产于美国、民主刚果、泰国、马来西亚、澳大利亚等国。

由于铌矿床的特殊性，如含矿品位较低，大多数铌矿物比重较大，且物理化学性能较稳定，因而重砂法是寻找原生矿床的一种经济、简便有效的找矿方法。对于碳酸岩及其风化壳型矿床用放射性测量、磁法测量等方法是非常有效的找矿方法。近年来，在澳大利亚西部韦尔德山碳酸岩风化壳大型高品位稀土-钇-铌-钽-磷酸盐矿床；巴西塞斯拉古什特大型铌矿和加蓬发现了大型铌矿。中国铌矿床主要分布于内蒙、湖北、广东等地，以铌铁矿为主，质量相对低，品位不及巴西的百分之一，伴生矿物多。

4）钽

据美国地质调查局统计，1998年世界钽储量约为14000 t，储量基础为24000 t，主要分布在澳大利亚、尼日利亚、民主刚果、加拿大和巴西等国。中国钽资源量不大，主要分布在江西、新疆、广西、湖南等地。钽矿物多属于与酸性花岗岩有关的复杂氧化物，在外生条件下一般较稳定。钽矿床的成矿时代主要在寒武纪，其次有加里东、海西和基米里期。原苏联学者将钽矿床划分为3种主要类型：

（1）综合性稀有金属伟晶岩矿床。这类矿床可分为三个系列：①与碱性花岗岩有关的Be-Li伟晶岩系列；②与二云母花岗岩有关的Be-Li-Cs-Ta伟晶岩系列；③与超酸性花岗岩有关的F-Ta-Li伟晶岩系列。成矿规模最大的是第一系列的锂辉石-钠长石和钠长石伟晶岩矿床。这种类型分布在巴西、澳大利亚、中非、南非、加拿大和原苏联。此类矿床的储量

约占西方世界钽储量的 34%和产量的 30%。加拿大的伯尼克湖矿床是世界最大的矿床之一。

(2) 花岗伟晶岩风化壳铌铁矿-钽铁矿矿床。这类花岗伟晶岩上的线性风化壳矿床发育在扎伊尔、巴西、澳大利亚。它们是中小型矿床，其钽含量不高，但易采，较经济，因而是钽的重要来源，约占西方世界产量的 53%。

(3) 铌铁矿-钽铁矿砂矿床。由于铌铁矿-钽铁矿很脆，这类矿床从原生矿床搬运的距离小于 7 km，大多为 2～3 km，一般还是在花岗岩母岩体或伟晶岩区内坡积-冲积层中聚积成矿，有时在风化壳中富集。最大的砂矿是扎伊尔卢古卢北部河谷。巴西、澳大利亚、尼日利亚、原苏联也有这类砂矿。

次要钽矿床和可能来源有：①钠长石-云英岩铌钽铁矿矿床；②综合性钠长石稀有金属的网脉矿床；③碱性花岗岩风化壳铌铁矿矿床；④碳酸岩铀烧绿石矿床；⑤碳酸岩风化壳含铀的烧绿石-褐钇铌矿矿床。

5) 锆

1992 年世界锆 (ZrO_2) 储量为 4900×10^4 t，储量基础为 5800×10^4 t，此外，还有已查明的锆石资源 6000×10^4 t。世界锆资源丰富，资源大国有澳大利亚、南非、原苏联、美国、印度和巴西。

锆是典型的亲石元素，锆矿床包括内生和外生矿床两大类，其中以砂矿床最为重要，它集中了世界 53%的锆储量，有 95%以上的锆石精矿来自砂矿床，外生矿床以海滨砂矿床最为重要，还有残积和冲积砂矿床、碳酸岩风化壳矿床等。锆的内生矿床主要是岩浆成因的，且与碱性岩有关。这类矿床多产在古老地台区及显生宙地槽区内的前寒武纪中间地块中，矿床储量一般不过几十万吨，地台区锆矿床的储量可达数百万吨。主要的锆矿床成因类型有：①含锆石碱性花岗岩；②含斜锆石碱性岩；③异性石岩；④霞石正长岩中的斜锆石脉；⑤含斜锆石脉流霞正长岩风化壳；⑥海滨砂矿（少量内陆锆石砂矿）。

刘曼华认为值得注意的世界著名的外生和内生锆矿床以及新近发现的新类型锆矿化有：①澳大利亚东西海岸的砂矿床；②巴西亚马孙州皮廷加内陆冲积和残积砂矿床；③与超基性-碱性-碳酸岩杂岩体有关的斜锆石矿床，如南非的帕拉博鲁瓦（即帕拉博腊）矿床和俄罗斯的科夫多尔矿床；④碳酸岩风化壳型与稀土、铌、钽及磷酸盐伴生的锆矿床，如澳大利亚西部韦尔德山碳酸盐风化壳矿床；⑤碱性杂岩体中的脉状和浸染状锆矿床，如巴西波苏斯-迪卡尔达斯含铀锆矿床；⑥与低温热液作用有关的新型锆矿化，如近年来在哈萨克斯坦中部和俄罗斯阿尔丹地区发现的低温条件下胶体溶液沉积作用所形成的锆矿化。综上所述超基性-碱性-碳酸岩杂岩体（包括碱性岩体）不仅是次生锆矿床（风化壳）的来源，而且也是与成矿物质的化学带出有关的远离杂岩体的锆矿床的来源。因此在寻找与这类杂岩体有关的锆矿床时，不仅要注意杂岩体本身，还要注意远离杂岩体可能成为锆富集的有利地段。

6) 稀土金属

世界稀土储量十分充足，据美国地质调查局统计，1998 年世界稀土 (REO) 储量和储量基础分别为 10000×10^4 t 和 11000×10^4 t。其储量分布高度集中，中国、原苏联、美国、澳大利亚和马来西亚约占总储量的 83.2%。目前工业利用的轻稀土（铈族稀土）主要从氟碳铈矿和独居石中提取，约占世界稀土氧化物 (REO) 产量的 99%，重稀土（钇族稀土）产

量极少，主要从磷钇矿、硅铍钇矿中提取。世界稀土矿主要生产国为中国、美国、澳大利亚和印度等。这些国家稀土矿山产量约占世界总产量的 78%。中国稀土矿山产量现已居世界首位，精矿约 95%来自内蒙古包头白云鄂博铁矿，其余来自南方离子吸附型稀土矿和混合稀土精矿以及四川冕宁牦牛坪稀土矿床。原苏联是欧洲最重要的稀土生产国，居世界第三位，稀土主要来自科拉半岛的磷灰石矿床、哈萨克斯坦的舍甫琴柯矿床和库捷切安矿床。澳大利亚、印度和马来西亚的稀土产量来自滨海砂矿的独居石，其中，澳大利亚占世界独居石总产量的 1/3 以上。磷钇矿是钇的主要来源，在澳大利亚、马来西亚和中国是作为开采锡的副产品生产的，也有的从加拿大埃利奥特湖德尼森的含铀淋滤残渣中提取。世界稀土工业以从生产稀土精矿、混合稀土等初级产品为主向高纯单一稀土的深加工产品方向发展。

稀土矿床种类繁多，按成因可划分为内生、外生和变质矿床 3 大类，再根据与矿床有关的侵入岩类及成矿作用的不同可划分 6 个类型：

（1）与碱性岩-碳酸岩有关的稀土矿床。世界稀土储量绝大部分产于这类矿床中。目前经济意义最大的是美国加利福尼亚州帕斯山矿床和中国内蒙古白云鄂博矿床。帕斯山矿床 REO 的证实储量约 500×10^4 t，平均品位 7%，是世界碳酸岩中最高品位。该碳酸盐的独特点是缺乏 Ti-Nb 矿物。白云鄂博矿床是一规模巨大富含稀土的铁矿床，稀土矿物可作为开采铁矿的副产品回收。该矿区稀土储量巨大。此外，布隆迪的卡隆格矿床和马拉维的坎甘昆德矿床均属此类型。

（2）碱性花岗伟晶岩稀土矿床。这类矿床分布较广，但具经济意义的矿床则罕见。加拿大魁北克省的怪湖矿床是一大型综合性稀土-稀有金属矿床，是稀土元素（钇和重稀土）的潜在来源。类似的矿床还产在原苏联的科拉半岛和美国科罗拉多州等地。

（3）非碳酸岩热液脉稀土矿床。矿床中除稀土矿物外，常富钍石。最典型的代表是南非开普省的斯滕坎普斯克拉尔矿床，这是国外最早发现的独居石矿床。

（4）含稀土磷灰石矿床。磷块岩中的磷灰石常富集稀土元素，在生产磷肥时可以回收。这类矿床虽然分布较广，但稀土品位高的大型矿床为数极少，如原苏联科拉半岛希宾碱性杂岩体稀土磷灰石矿床；芬兰锡林贾维碳酸岩矿床中的磷灰石和瑞典北部基鲁纳铁矿床的磷灰石是潜在的含稀土磷灰石资源。中国贵州紫金为含稀土沉积磷块岩矿床。

（5）风化壳型稀土矿床。这类矿床是富含稀土元素的原生矿床经风化作用形成的，其经济意义较大。典型矿床有巴西阿拉沙碱性杂岩体和中国南方花岗岩的风化壳型矿床。前者 REE 最高含量大约为 6%，红土富含 REE，是上部碱性岩的 5～15 倍。后者又称离子吸附型稀土矿床。

（6）砂矿床。现代和古代砂矿中的独居石曾有稀土氧化物的主要来源，现在只占次要地位。澳大利亚、巴西、印度和马来西亚等国稀土氧化物主要来自独居石砂矿床。澳大利亚独居石砂矿床产量居世界首位。

80 年代在澳大利亚南部发现的特大型奥林匹克坝铜铀矿床是稀土元素的巨大潜在来源。近年查明在原苏联滨海地区一个新生代凹陷的煤层中存在特殊的稀土矿化，在我国山西省石炭系铝土矿层中有较高含量稀土矿的报道，尚未发现具有工业价值的矿床。

2.2.7 非金属矿产

1）金刚石

世界金刚石产量50%以上来自澳大利亚、扎伊尔、博茨瓦纳、俄罗斯和南非5个国家。据美国地质调查局估计，1998年世界总储量9.8亿克拉（1克拉=0.2 g），储量基础19.0亿克拉，宝石级储量基础估计有3亿克拉。大型和特大型金刚石矿山有澳大利亚的阿盖尔；博茨瓦纳的奥拉帕、朱瓦能、莱特拉卡内；俄罗斯的“和平”、“成功”；南非的芬什、普雷米尔、韦内齐亚，上述9个矿山金刚石产量占世界产量的70%左右。目前，世界天然金刚石产量75%来自于原生矿床（金伯利岩或钾镁煌斑岩型），25%来自于冲积矿床，世界上除澳大利亚和印度有具工业意义的钾镁煌斑岩型金刚石矿床外，其余原生矿均为金伯利岩型。

中国金刚石储量在世界总储量中所占比例很小，仅有1.02%，属急缺矿种。几十年来，自给率很低。近年来，年产金刚石只有6万～7万克拉，而需求却达70多万克拉，不足部分靠进口解决。到本世纪末，中国约需金刚石150万～200万克拉，按已有储量只能规划生产40万～50万克拉，需新增储量5000万克拉，因此勘查金刚石的任务是十分繁重和艰巨的。

1880年在南非发现的第一个原生矿床亚赫斯丰坦岩筒和1979年在澳大利亚西部阿盖尔发现的钾镁煌斑岩型矿床是世界金刚石找矿及开发史上两个最重要的里程碑。80年代以来主要有下述重大发现：俄罗斯的阿尔汉格尔斯克（Arkhangelsk）矿和萨彦岭（Sayany Mountains）矿；澳大利亚的新南威尔士州科普顿（Copeton）矿和西澳大利亚州阿列什（Aries）矿；南非德兰士瓦省维尼舍（Venetia）矿；美国科罗拉多州斯隆（Sloan）矿；叙利亚霍姆斯省卡迈哈矿；加拿大西北地区耶洛奈夫波因特湖（Point Lake）矿；委内瑞拉拉萨尔瓦金（La Salvacion）金刚石矿；博茨瓦纳察邦（Tshabong）含金刚石金伯利岩田；中国湖南宁乡发现含金刚石的橄榄钾镁煌斑岩，共发现14个岩体，选样中已发现59颗金刚石，此外，还有辽宁大连-盖县、辽宁瓦房店岚崮山地区、山东平邑、江苏新沂-泗洪、安徽泗县、山西应县、湖北鄂西、贵州遵义等地区新发现一批金刚石及其指示矿物异常。但总的看，未有重大突破（张中伟，1994[1]）。

随着同位素地质学、矿物包裹体学的迅速发展及金刚石普查勘探取得的成就，人们对金刚石及其矿床形成的认识进一步加深，对其成矿理论研究取得了显著的进展。传统认为金刚石是金伯利岩中的斑晶，最初是在地球深处从金伯利岩岩浆（熔融体）中晶出的，即金刚石是与金伯利岩同源同时期形成的。80年代初以来，由于同位素年龄测定技术的发展，其测定表明：金刚石年龄通常比金伯利岩老得多，为金刚石捕虏晶成因说提供了重要证据。捕虏晶说认为，金刚石是在地球深处在金伯利岩侵位之前就已形成，金伯利岩岩浆在从地球深处沿断裂或裂隙上升至地表的过程中捕虏了含金刚石的岩块，并一起在地壳浅处定位。但是，金刚石与金伯利岩没有成因上的联系。金刚石中同生包体的绝大多数可划归两大成因组合，即超镁铁（橄榄岩）组合和榴辉岩组合，亦称之为P型（橄榄石、顽火辉石、透辉石、含铬镁铝榴石、铬尖晶石等）和E型（绿辉石、镁铝榴石-铁铝榴石、透长石、蓝晶石、柯石英等）共生组合，含有该类型包体的金刚石分别称为P或E型金刚石。就世界范围而言，P型较E型分布更普遍，大致为3∶1，这正好反映了上地幔的两种主要组成岩石类型-橄榄岩与榴辉岩及其数量关系。从未发现两种组合的包体同时共存于一个主晶中，这

---

[1] 张中伟. 我国金刚石找矿突破的可能途径和对策远景. 见：戴自希，吴智慧，李树枝等. 1994. 地质矿产信息研究成果（29）——我国急缺矿产找矿突破的途径和对策，北京：中国地质矿产信息研究院. 176～191.

充分说明，金刚石形成的地质环境不是金伯利岩钾镁煌斑岩等幔源火山岩，而是陆下上地幔岩石圈，因此，金刚石不是主岩中的斑晶，而是地幔捕虏晶。中国辽宁、山东金伯利岩中金刚石包体矿物的研究也支持了上述结论，另外，金刚石 P 型包体矿物富含 Mg、Cr、贫 Ca、Ti 的地球化学特点，反映了金刚石形成源区亏损玄武岩。说明含金刚石主岩的源区是地球化学上极度亏损的岩石圈底部相对冷的稳定环境，有利于金刚石的长期保存（张安棣，1994）。

金刚石成因新说具有重要意义，既然金刚石与主岩之间并无直接的成因关系，那么，对原生矿勘查优选靶区，首先不应是控岩构造，合理的做法应该是直接瞄准有可能产出金刚石的古老、稳定的克拉通，再看是不是具有地球化学亏损的前提，即：有无玄武岩广泛喷溢，这是金刚石产出的前提。金伯利岩和钾镁煌斑岩是地幔交代作用发育的产物，没有适当的构造活化（其表现有的称构造活化带或深断裂，有的则称热点、地幔柱），金伯利岩、钾镁煌斑岩岩浆无法携带金刚石到达地表，所以，断裂构造仍是重要的，但不再是第一位的。

近年来，世界金刚石勘查的经验表明：①古老克拉通仍是寻找金刚石的最佳地区。地台越老越稳定且越靠近地台中心越有希望找到金刚石，如加拿大西北地区、澳大利亚阿里什地区等发现的含金刚石金伯利岩均位于古老且稳定的地台内部。②在古老克拉通边缘活动带寻找金刚石值得重视。如 80 年代以来在南非、澳大利亚均发现了不仅是钾镁煌斑岩型，还有金伯利岩型金刚石矿床。③已知含金刚石的地区是金刚石勘查工作的重点。例如，俄罗斯阿尔汉格尔斯克金刚石矿床，以及澳大利亚和南部非洲许多含金刚石的金伯利岩和钾镁煌斑岩等。④含金刚石的岩石类型不断扩大。近年来在其他岩石中不断发现金刚石。例如，原苏联在变质成因和陨石冲击成因的岩石中发现金刚石，在叙利亚西北部发现金刚石产于非金伯利岩和非钾镁煌斑岩火山爆发岩筒中，在世界各地多处橄榄岩等幔源岩石中发现有金刚石。因此，在勘查中除应注意金伯利岩型是最主要的找矿岩石类型外，还应重视这些非传统的含金刚石岩石类型。⑤重砂矿物指示法得到进一步发展。经典的重砂法仍然是优选靶区的主要方法，但重砂法所依托的理论基础及技术内容发生了变化。原来，重砂指示矿物强调的是含铬镁铝榴石、铬透辉石和镁钛铁矿。近年来，强调铬尖晶石、G10（高铬低钙）石榴子石作为指示矿物的重要性。但对南非大陆以外地区不一定都能适用。近年来，澳大利亚格里芬等人提出了用质子探针分析石榴子石和铬铁矿等矿物痕量元素来评价勘查靶区的新方法较为先进。他们还认为铬铁矿的锌含量也与形成温度有关，它也能帮助区分不同条件下形成的铬铁矿。另外，铬铁矿的锆和铌含量可用来帮助区别来自金伯利岩、钾镁煌斑岩和其他一些岩石（如绿岩带的、蛇绿岩套的等）的铬铁矿。镁钛铁矿的痕量元素也能用来帮助区分是否金伯利岩来源，而且不同金伯利岩岩体中的镁钛铁矿常有其不同痕量元素“指纹”。上述指示矿物中的痕量元素方法能较好地帮助寻找金刚石矿床。⑥遥感、物探、化探、重砂矿物指示综合方法是金刚石勘查最优化方法。这些方法在金刚石勘查中都能发挥各自的作用，其中任何一种方法都能圈出有远景的岩体。但用两、三种方法结合起来使用则效果更好、效率更高。例如，加拿大西北地区含金刚石金伯利岩的发现是航磁、电磁、地质测量与重砂矿物指示法综合运用的结果。

2）硫

据美国地质调查局统计，1998 年世界硫储量 14×10^{8} t，储量基础 35×10^{8} t，资源总量

约有 50×10⁸ t。世界各国生产的硫分别来自自然硫矿床（矿山硫）、天然气（回收硫）、高硫石油（回收硫）、黄铁矿和有色金属硫化物。矿山硫和回收硫也称元素硫，后二者分别称为黄铁矿硫和有色金属硫化物硫。

自然硫是呈固体状态的元素硫，根据其形成环境分为沉积环境中自然硫矿床和火山环境中自然硫矿床，前者经济意义大，目前，世界上开采的自然硫矿床几乎全部来自这一类型。近年来，对这类矿床形成机理的研究有一定进展。沉积环境中自然硫矿床主要形成于低温成岩环境和高温成岩环境中。

高温成岩环境主要为深部酸性天然气储层中的元素硫以气液相为主，呈固相的很少。当天然气被开采或运移到较浅部环境中由于温度、压力的改变，气液相元素硫发生沉淀，形成自然硫堆积。

低温成岩环境中自然硫矿床形成温度为 0℃至 60～80℃，形成深度小于 2000～2500 m，pH 值一般为 4～9，自然硫（S^0）均是通过非生物的（化学的）或生物的（微生物的）作用从溶解的硫酸盐（SO_4^{2-}）中转化而来的。但是，硫酸盐不是直接转化为自然硫，而是先还原成硫化氢（H_2S），然后再氧化成自然硫。因此，硫化氢的形成是产生自然硫的先决条件。

低温成岩环境中硫化氢的形成是由细菌作用和生热作用引起的，前者是主要的。硫酸盐还原细菌在有机混合物参与下将硫酸盐还原为硫化氢。H. G. 麦切尔归纳出 6 种在低温环境中硫化氢转化为自然硫的形成作用：①分子氧引起的硫化氢无机氧化作用；②高价铁化合物引起的硫化氢无机氧化作用；③复硫化合物的歧化；④无色硫细菌的微生物代谢；⑤有色硫细菌的微生物代谢；⑥某些硫杆菌的微生物代谢。其中，由第 1 种作用形成的无机后生自然硫矿床规模最大，最具有经济意义。主要产于盐丘冠岩、礁岩和其他层状蒸发岩。自然硫呈较粗晶胶结物，常与烃类伴生，并与活动地下水系统密切相关。

在自然硫矿床勘查方面，由于自然硫矿床的形成与烃类密切相关的理论得到进一步证实，国外对油硫兼探继续给于重视，并取得成效。例如，美国墨西哥湾北部有大量蒸发盐建造，盐丘构造发育，有良好的油气显示。同时在该区发现特大型自然硫矿床。

3）磷

据美国地质调查局统计，1998 年世界磷矿储量 120×10⁸ t，储量基础 350×10⁸ t，世界磷资源丰富，分布广泛，但很不均匀。世界上 60 多个国家和地区查明有磷矿资源，但 90% 集中在摩洛哥、美国、原苏联（主要是俄罗斯和哈萨克斯坦）、中国、沙特阿拉伯。中国及其周边国家毗邻地区是世界第三大磷矿资源集中区。

70 年代后期以来实施了国际地质对比计划（IGCP）第 156 项“磷块岩”，该项计划在①国际磷酸盐资源数据库；②元古宙和寒武纪磷块岩；③白垩纪-始新世磷块岩；④年轻成磷体系等方面进行了重点研究。在 1991～1995 年后续了 IGCP 第 325 项“古地理与磷块岩和有关自生矿物的相关关系”研究，该项目的目的是查明磷酸盐成因及其有关成矿区的古地理特征，查明有利于磷酸盐矿床形成的条件，并解释白垩、燧石、石油、海绿石和磷酸盐源岩层位上的相互关系。

世界磷矿床按其成因可分为：①海相沉积磷块岩矿床；②岩浆成因磷灰石矿床；③变质成因磷灰石矿床；④与鸟粪堆积有成因联系的鸟粪磷块岩矿床（主要产在一些大洋岛屿上），它们可统称为磷酸盐岩（Phosphate rock）矿床。其中，不论从地质意义上，还是从

经济意义上讲，海相沉积磷块岩矿床都最为重要。据估计世界磷酸盐岩 90%以上的资源量和约 80%的产量来自这一类型，岩浆型磷灰石矿床次之，其它类型仅占资源量和产量的 1%。

中国磷矿资源总量丰富，以海相沉积磷块岩矿床类型最为重要。约占已探明储量的 85%，岩浆岩型（包括变质岩型）磷矿床占 14.6%，其它类型仅占 0.4%左右。磷矿资源分布极不平衡。云南、贵州、湖南、湖北、四川等南方 5 省可利用磷矿储量占全国的 74.7%。北方地区只占 21.9%，矿床规模小，磷肥严重短缺。故必须重视中国北方磷矿地质找矿。加强北方与南方以及邻国的含磷区地质对比，选择成磷条件较好的已知含磷区作为磷块岩的重点研究和勘查靶区，如河南（辛集）、安徽（凤台）、山西（中条山）地区、西北中天山（科古尔琴）、塔里木地块北侧（柯坪）等地区。同时，应以上升洋流成岩理论为基础的现代磷块岩成矿理论为指导，以岩相古地理分析为基础的方法在北方寻找磷块岩。此外，要重视在已知碱性岩区带寻找规模大、品位富的岩浆成因磷灰石矿床。还应该重视对已有磷矿地质资料的二次开发。

4）钾盐

据美国地质调查局统计，1998 年世界钾盐储量 84×10^8 t（K_2O，下同）储量基础 170 $\times10^8$ t，资源总量约 2500×10^8 t，世界钾盐的保证程度是非常高的，是大宗矿产中储量保证年限最高的一种矿产。世界钾盐资源分布极不平衡，具有工业意义的钾盐矿床仅分布在十几个国家中，其中，加拿大、俄罗斯、白俄罗斯、德国的钾盐储量和储量基础分别占世界的 93%和 81%，东南亚钾盐资源比较丰富，但主要是光卤石，其资源量估计为 100×10^8 t。

通过对大型含钾盐盆地及钾盐矿床形成的地质标志（包括大地构造和古地理背景、成钾时代、含钾盐沉积剖面、岩盐分布、钾盐矿石成分、沉积环境等）进行系统分析、对比和归纳，总结其形成特点和规律如下：①含钾盆地在大地构造上具有明显的一致性。它们通常位于地壳上长期坳陷的地台活动带-台向斜、各种坳陷、凹陷等。但是，各个地质时期具体的构造位置是多种多样的。②在成矿时代上，已知钾盐矿床形成于自寒武纪以来（除奥陶纪外）的所有地质年代中，但有一半以上矿床形成于中晚泥盆世、二叠纪和第三纪。③含钾建造根据其与顶底板非盐类围岩的位置关系分成不同类型。④矿床类型主要有氯化物型和氯化物-硫酸盐型，极少数矿床为单一硫酸盐型。85%以上的钾盐矿床储量属于氯化物型。⑤大多数钾盐矿床，特别是大型-特大型钾盐矿床下伏岩盐（主要为石盐）分布范围广、沉积厚度大、韵律层数少。其分布范围和厚度与岩盐成正比。⑥80%含钾盆地含有油气层。⑦氯化物型钾盐矿体通常为层状，硫酸盐型钾盐矿体有层状和透镜状。⑧钾盐层通常产在含钾建造剖面的中上部。⑨在大多数含钾盆地中，钾盐层通常只占盐层面积的 5%～10%。⑩含钾建造中分布最广泛的含钾岩石依次为光卤石岩、钾石盐-光卤石岩和含光卤石的钾石盐岩。⑪许多含钾建造中含有岩浆侵入岩、喷出岩及其分解产物。⑫许多含钾盆地中发育同沉积构造，含钾建造与盐下层同沉积构造运动密切。⑬绝大多数钾盐矿床形成于海相环境。

综观钾盐矿床勘查发现史，吴智慧注意到其发现大致有以下几种途径和方法：①在寻找和开采其他矿产或地质施工时“偶尔”发现，如世界上最早的德国施塔斯富特钾盐矿床是在开采石盐时发现的，中国云南勐野井钾盐矿床是在采坑的老硐中发现的。②在勘查石

油天然气时发现的，据统计，一半以上的含钾盆地和钾盐矿床是这样发现的，也是发现含钾盆地和钾盐矿床的主要途径。这里有偶尔发现的，有的是有目的分析石油钻井岩屑和钻孔冲洗液样而分析的。③根据水化学研究发现，分析地下水或卤水中钾溴含量及溴氯系数变化是一种应用广泛且比较成熟的找钾方法。④通过科学预测以及有目的的研究和勘查而发现的，如俄罗斯涅帕钾盐矿床。从以上可见，钾盐矿床的发现与油气勘探密切相关。这不仅仅因为钾盐矿床经常与油气共生，而更重要的是油气勘探能提供对钾盐勘查非常丰富的有用资料。

世界钾盐资源虽丰富，但中国钾盐资源却不足，农田施用肥中氮、磷、钾比例长期失调。已探明的钾盐资源不多，主要分布在青海柴达木盆地（现代盐湖型）和云南兰坪-思茅盆地（古代固体钾盐）。根据中国实际情况对钾盐找矿应注意：①钾盐找矿是我国的一项长期战略任务，在近期内可继续对柴达木、罗布泊等地的富钾卤水开展地质找矿和综合开发的调查研究；对古代钾盐可结合国土大调查和在区域地质构造、岩相古地理研究等方面的进展，不断提高对我国钾盐成矿远景预测的认识。②油盐兼探是钾盐勘查的重要途径，钾盐不仅与油气密切共生，而且在勘查上前者对后者有很大的依赖性，油气勘查过程中所获得的各种地质资料对发现和圈定钾盐矿床具有不可估量的作用。塔里木和陕甘宁盆地等可作为重点油盐兼探区。③在我国近邻或其他钾盐矿产资源丰富的国家，通过调查评估，择优投资开发，为国内提供稳定供应的钾资源。④总结和整理世界及中国的钾盐地质资料和找钾的经验，积极发展钾盐成矿理论和找矿方法，开拓符合中国地质特点的钾盐地质工作。

5）硼

据美国地质调查局统计，1998 年世界硼矿石储量 1.7×10^8 t，储量基础 4.7×10^8 t。世界硼矿资源分布很不均匀，绝大部分分布在美国、土耳其、俄罗斯和哈萨克斯坦。世界硼矿床的类型按其工业意义可依次分为：①火山-沉积型；②盐湖沉积型；③变质再造型；④夕卡岩型；⑤海相卤素型；⑥天然水溶液型；⑦火山喷发型（郑绵平 1987，姜春潮 1994），其中较为重要的有：

（1）火山-沉积型矿床。此类矿床大多数产于大陆主动边缘及碰撞带火山带中，是世界硼资源的最重要类型，占世界硼矿总储量的大部分，土耳其和美国所开采的硼矿床均为此类型。其特点是规模大、品位高、成矿时代较晚。所有已知火山-沉积型硼酸盐矿床都位于太平洋和阿尔卑斯-喜马拉雅构造-火山带范围内，火山沉积硼矿床按含硼岩系又可分为火山岩-粘土型（如美国克拉默硼矿床）和碳酸盐岩-粘土型（如土耳其的基尔卡、埃梅特和比加迪矿床）两个类型。

（2）盐湖沉积型矿床。通常见于新生代干旱-半干旱内陆区。深部水和火山喷气可能是大陆湖盆硼的主要来源和生盐盆地卤水富硼的来源，而地表水和地下水可能是硼的次要来源。有不少矿床在干盐湖内有含硼和含锂的卤水与固态硼酸盐同时存在，说明存在过渡型矿床，如智利的阿塔卡马干盐湖。盐类型硼矿床产于阿根廷、美国、中国、印度、伊朗和秘鲁等国。

（3）变质再造型矿床。主要产于元古宇沉积变质区。由于热变质和区域变质使原来沉积的硼矿床发生变质，而形成新的硼矿聚集体。中国辽宁和吉林后仙峪等地硼镁石-遂安石矿床和辽宁翁泉沟硼镁石-硼镁铁矿床均属该类型代表性矿床，其规模较大。矿石 B_2O_3 品位，前者 10%～15%；后者 5%～10%。

(4) 夕卡岩型矿床。硼的工业富集在钙夕卡岩和镁夕卡岩中，如原苏联滨海地区的达尔涅戈尔斯克矿床即属钙夕卡岩型。镁夕卡岩型硼矿床多属大、中型。原苏联、罗马尼亚、中国、朝鲜、美国、意大利、法国均产有镁夕卡岩型硼矿床。

从新构造概念出发，世界绝大多数火山-沉积型和钙夕卡岩型硼矿床分布于两大全球性构造褶皱带，即环太平洋褶皱带和阿尔卑斯-喜马拉雅褶皱带，这是大陆主动边缘，而镁夕卡岩型硼矿床则产于克拉通地区，有的亦见于其他显生宙褶皱区。盐类型硼矿床赋存于大型的大陆坳陷。

6) 萤石

1998 年世界萤石储量和储量基础分别为 2.2×10^8 t 和 3.7×10^8 t，查明的萤石资源约为 4×10^8 t，磷块岩中可回收萤石资源量约为 3.3×10^8 t。世界上有 30 多个国家生产萤石，中国是最大生产国，约 160×10^4 t，占世界总产量的 30%～35%，此外较重要的有原苏联、蒙古、墨西哥、南非等国占 35%～40%。

萤石矿床遍布世界各洲，主要集中在欧洲和亚洲，其次为非洲和北美洲。萤石形成的地质环境很广，从岩浆作用到外生作用的各种地质条件下均可形成。已发现的萤石工业矿床产于碳酸盐岩、伟晶岩、溶液沉积、夕卡岩及其他产物之中，而以热液矿床最为重要。杨越从经济角度划分出 7 种重要的萤石矿床类型：①火山岩、变质岩和沉积岩裂缝中的脉状萤石矿床。以这种形式赋存的萤石在世界上到处可见。如西班牙北部的奥索尔矿床，意大利北部的托尔戈拉矿床，英国和美国均有著名的萤石大矿脉矿床。②碳酸盐岩中的层状、似层状及席状交代矿床。在美国伊利诺斯州南部罗克地区，墨西哥科阿韦拉州的北部地区和南非德兰士瓦奥托斯胡普地区等均有此类层状交代萤石矿床。③碳酸盐岩与酸性火山岩的接触交代萤石矿床。这种矿床在世界上很常见，如墨西哥的圣路易斯波托西州和阿瓜恰勒、里奥贝而德地区以开采这种交代萤石矿床而闻名。④剪切带和角砾带中的网状和充填萤石矿床。南非德兰士瓦省的布法罗萤石矿床属此类型，萤石矿呈细网脉状产于布什维尔德杂岩体的花岗岩岩床中。美国西部有许多矿脉呈网状，氟化钙的含量低。⑤碳酸岩和碱性杂岩体边缘部分的萤石矿床。该类矿床萤石品级较低，通常达不到经济要求，但纳米比亚的奥科鲁斯萤石矿床例外。⑥原生矿床风化的残积矿床。这是冶金级萤石的重要来源。在西班牙的阿斯图里阿斯地区和泰国，大量开采这种强烈风化的萤石矿床。⑦富含萤石的脉状铅锌矿床。世界上许多地方的脉状铅锌矿床中含有较多量的萤石，且呈脉石矿物产出，开采时可从尾矿或废弃的矸石中作为副产品回收。如墨西哥的帕拉尔地区的铅锌矿山。除以上 7 种矿床之外，还有一些不常见的类型有时也具有工业价值，如在印度和南非发现有碳酸岩-碱性岩中呈浸染状产出的萤石矿床；美国犹他州、内华达州和蒙大拿州等地发现有充填在火山角砾岩和伟晶岩中的萤石矿床；意大利南部卡斯特尔-朱利亚诺地区的湖相沉积萤石矿床等。上述矿床以碳酸盐岩中的层状、似层状交代型矿床为主，其次是火山岩、变质岩、沉积岩中受构造断裂控制的充填型脉状矿床和构造破碎带中的网膜状萤石矿床。

7) 重晶石

世界重晶石资源丰富，据 1998 年美国地质调查局统计，世界重晶石探明储量 1.5×10^8 t，储量基础 4.8×10^8 t，资源量约有 20×10^8 t。其分布很广，遍及各大洲，主要分布在中国、哈萨克斯坦、美国、印度、加拿大、摩洛哥、土耳其等 20 多个国家和地区。重晶石是在中低温溶液条件下和外生作用过程中形成的。无论是内生作用或是外生作用，钡的原始

来源都是岩浆源。重晶石矿床有：

(1) 溶液型矿床。这类矿床品位高，优质重晶石精矿主要来源于此类型矿床，这类矿床在自然界分布广泛，是世界上许多国家重晶石资源的主要来源。①脉状矿床重晶石品位高，但矿体规模一般不大。这类矿床的储量一般属小型，少数中型，个别属大型。原苏联高加索众多的脉状重晶石矿床是典型代表。此外，印度、德国、意大利、英国、法国、希腊、阿尔及利亚、摩洛哥等世界许多国家也有此类矿床。②层状溶液交代型矿床一般属大型或巨大型。如格鲁吉亚的阿普什连矿床，德国的加尔察西南重晶石矿床和法国中央地块的矿床也属此类型。

(2) 层控型矿床。J. B. 梅纳德等根据重晶石产出的大地构造背景和地层与地球化学特征把层状重晶石矿床划分为 2 种类型：①“大陆边缘型”重晶石矿床，如美国阿肯色州沃希托山脉的凡西希尔、张伯伦克里克矿床以及内华达州中部的东诺森伯兰坎宁矿床和中国湖南省的新晃矿床；②“克拉通裂谷型”重晶石矿床，这种矿床常伴生具重要意义的铅锌矿化，例如德国的麦根和拉默尔斯贝格矿床和加拿大的塞卢因矿床；③残积重晶石矿床，此类矿床形成于原生风化壳环境。易采易选是此类矿床的特点。残积矿床在美国分布广泛，是美国重晶石矿的重要来源，它们主要分布在密苏里州，宾夕法尼亚州至阿拉巴马州和阿巴拉契亚地区，田纳西州的斯韦特沃地区和佐治亚州的卡特斯维尔地区，占美国重晶石总储量近一半，占产量的 60%。此外，原苏联南乌拉尔梅德韦捷夫矿床也是一典型的残积矿床，矿床规模大。

2.2.8 宝玉石

宝石因其珍贵美丽，作为佩戴或观赏、珍藏之物而受人们钟情和喜爱。在国际市场上，其价格、需求量和贸易量增长速度明显高于其他商品。与大多数矿产分布不同，宝石矿床主要产在发展中国家，其中，南部非洲、东部非洲、南美洲、南亚、东南亚宝石资源最为丰富。在发达国家中，澳大利亚和原苏联宝石资源较多。

1) 绿柱石

(1) 祖母绿：长期以来，哥伦比亚是祖母绿的主要供给地。80 年代以来，巴西、赞比亚发现的祖母绿矿床质优量大，但哥伦比亚在高质量祖母绿生产和出口方面仍占有明显优势。此外，在津巴布韦、马达加斯加、巴基斯坦和阿富汗等国发现了新矿床，其开采量增长较快。

(2) 海蓝宝石：宝石级海蓝宝石的重要来源仍然是巴西的米纳斯吉拉斯地区。近年来，尼日利亚、津巴布韦、赞比亚、纳米比亚、马达加斯加、巴基斯坦和印度也都发现了数量可观的宝石级海蓝宝石。

2) 刚玉

(1) 红宝石：东南亚（缅甸的抹谷、泰国的占他武里和柬埔寨的拜林）仍然是红宝石的主要产地。东非（肯尼亚、坦桑尼亚、马拉维）近年来也开发了一些红宝石新产地，但是，红宝石质量不如东南亚产地。此外，在巴基斯坦、阿富汗、印度和尼泊尔也产有少量红宝石。

(2) 蓝宝石：它也主要来自东南亚，如泰国西南部北碧。澳大利亚和东部非洲蓝宝石开采发展较快，如澳大利亚昆士兰和新南威尔士州产有多种颜色的宝石级蓝宝石。

3) 金刚石

80 年代以来，世界各地发现多处金刚石矿床，属大型矿床的有：俄罗斯阿尔汉格尔斯克、南非韦内齐亚、加拿大西北地区波因特湖。纳米比亚和南非滨海、近海已知有 15 亿克拉宝石级金刚石资源量。世界宝石级金刚石（钻石）主要产于南非、俄罗斯、纳米比亚、安哥拉。

4）石榴子石

宝石级石榴子石仍然由印度、斯里兰卡、莫桑比克和马达加斯加等众多重要矿床产出。近年，东部非洲已成为一个宝石级石榴子石的重要产地。

5）蛋白石

宝石级蛋白石（欧泊）主要产地仍然是澳大利亚，尤其是新南威尔士、南澳大利亚和昆士兰地区。此外，还有美国和墨西哥。

6）水晶

（1）紫水晶和黄水晶：巴西是优质紫水晶和黄水晶的主要产地。赞比亚有深色的带红色的紫水晶，在西澳黑德兰港附近也发现了优质紫水晶。

（2）蔷薇石英：纳米比亚、莫桑比克、马达加斯加和巴西 80 年代以来的开采量增加较快。蔷薇石英可制成优质宝石材料和星彩石、猫眼石。

7）尖晶石

它主要来自那些传统的产地，如缅甸、柬埔寨、泰国的原生和次生矿床及斯里兰卡的次生矿床。近年，在原苏联帕米尔山发现非常大的透明粉红色尖晶石。

8）黄玉

黄玉的产地主要在巴西、巴基斯坦。

9）电气石

巴西是宝石级电气石（碧玺）最重要的产地，其颜色变化范围很宽，如巴西帕拉伊巴州若泽-巴特哈地区具有异常紫罗蓝色、蓝色和绿色的电气石。东部非洲的肯尼亚、赞比亚和坦桑尼亚发现有异常颜色和成分的电气石。其传统生产国有阿富汗、纳米比亚、斯里兰卡和美国。

10）翡翠

翡翠主要产于缅甸。1998 年张锁柱等介绍了翡翠矿床形成的地质构造环境和翡翠形成的物理化学条件及控制因素等。张金富等认为翡翠矿床是在板块缝合带高压低温条件下形成的变质-岩浆热液交代多成因复成矿床。在我国，西藏、云南、四川和新疆的一些地区有与形成翡翠相近的区域地质条件。

中国宝玉石研究始于 30 年代，发展缓慢。90 年代以来进展较快，对中国宝玉石矿床、各种宝玉石的特征、宝玉石检测技术与方法、天然宝玉石优化与加工技术、观赏石、宝玉石资源利用和营销等进行了深入研究，开创了一个新的局面。近年来，中国宝玉石工作者对天然宝玉石的类型产地作了综合报导，研究了湖南和山西的金刚石矿床、云南的祖母绿矿床、云南、新疆和安徽的红宝石矿床、中国东部的蓝宝石矿床、伟晶岩型宝玉石矿床及似伟晶岩型海蓝宝石矿床。还有新近发现的透辉石矿床和方钠石矿床。一些学者论述了宝石颜色的定量和指数化，猫眼光和星光的成因。还深入研究了中国红宝石、蓝宝石、金绿宝石、海蓝宝石、电气石（碧玺）、钠柱石和黄玉（托帕石）等宝石的形成机制。我国已将 150 多种玉石进行了归类，对我国历史悠久的软玉和独玉作了较全面的总结，还发现了鸡血

石新品种——朱砂玉等。在宝玉石质量检测和监测方面应用了波谱分析、拉曼光谱分析、X射线分析、红外光谱分析、电子探针分析及快速简易检测等方法，用以区别天然宝石和人工合成宝玉石以及人工优化品。对翡翠A、B、C货的鉴别及赭石的预测亦有重要的参考价值。天然宝石的优化技术，如金刚石的改色和山东蓝宝石颜色改善的研究为天然宝石优化创出了一条新路。总之，我国宝玉石资源十分紧缺，一方面需注意寻找新的宝玉石资源，另一方面需对已有宝玉石资源进行有计划的合理开发，防止滥采乱挖，提高宝玉石资源的综合利用率。

主要参考文献

中国地质矿产信息研究院编著. 1996. 国外矿产资源. 北京：地震出版社.

王正邦. 1990. 铀矿地质发展趋势及对策. 见：中国地质学会主编. 当今世界地球科学动向——中国科学家谈第28届国际地质大会. 北京：地质出版社，103～106.

马东升. 1998. 地壳中流体的大规模流动系统及其成矿意义. 高校地质学报，4：250～261.

邓晋福，莫宣学，赵海玲等. 1999. 岩石圈/软流圈系统的大灾变与巨型矿集区形成. 矿床地质. 第18卷第4期，309～315.

毛景文，华仁民，李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区. 矿床地质，第18卷第4期，1～8.

白鸽，吴澄宇. 1994. 中国银矿类型及找矿方向. 见：赵一鸣主编. 中国主要矿产资源形势分析与普查找矿策略. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊，第3号，122～130.

朱士兴. 1993. 生物成矿作用. 见：肖庆辉，李晓波，刘树臣等著. 当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域. 武汉：中国地质大学出版社，340～343.

刘若新. 1996. 地球内部流体研究. 见：《21世纪初科学发展趋势》课题组编著. 21世纪初科学发展趋势. 北京：科学出版社，271～272.

芮宗瑶，王龙生. 1997. 中国铜矿资源的初步评估与对策. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊，第1号（总第31号），49～59.

陈毓川，朱裕生. 1993. 中国成矿模式. 北京：地质出版社.

陈毓川，张之一，项礼文等. 1997. 90年代地球科学的动向——第30届国际地质大会学术报导. 北京：地质出版社.

陈毓川. 1999. 矿床成矿系列与成矿预测. 见：陈毓川主编. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法. 北京：地震出版社，19～25.

郑绵平. 1987. 硼矿床类型与我国找硼方向. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊，第2号，47～54.

赵一鸣. 1994. 我国铁矿/金矿资源分析和地质工作重点. 见：赵一鸣主编. 中国主要矿产资源形势分析与普查找矿策略. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊，第3号. 23～29.

涂光炽. 1994. 超大型矿床的探寻与研究的若干进展. 地学前缘，第1卷第3期，45～53.

涂光炽. 1996. 超大型矿床的寻求和探索理论研究. 见：《21世纪初科学发展趋势》课题组编著. 21世纪初科学发展趋势. 北京：科学出版社，263～265.

张安棣，许德焕. 1994. 我国金刚石原生矿床找矿形势分析及对策. 见：赵一鸣主编. 中国主要矿产资源形势分析与普查找矿策略. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊，第3号，114～121.

姜春潮，郑绵平，王培君等. 1994. 中国硼矿床. 见：《中国矿床》编委会编著. 中国矿床（下册）. 北京：地质出版社，60～107.

贾跃明. 1993. 地壳中的流体作用. 见：肖庆辉，李晓波，刘树臣等著. 当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域. 武汉：中国地质大学出版社，54～66.

贾跃明. 1995. 地球内部流体与成矿. 见：《走向二十一世纪的中国地球科学》调研组编. 走向二十一世纪的中国地球科学. 郑州：河南科学技术出版社. 189～198.

施俊法，吴传璧. 1996. 巨型矿床勘查战略：经验模型与概念模型的交叉与结合. 见：中国地质矿产信息研究院编著. 走向21世纪的地学与矿产资源. 北京：地质出版社，124～128.

盛继福．1994．我国钨矿资源状况与开发利用情况．见：赵一鸣主编．中国主要矿产资源形势分析与普查找矿策略．中国地质科学院矿床地质研究所所刊，第3号，66～73．

殷鸿福，谢树成，周修高．1994．微生物成矿作用研究的新进展和新动向．地学前缘，第1卷第4期，148～156．

程裕淇，陈毓川，赵一鸣．1979．初论矿床的成矿系列问题．中国地质科学院院报，第1号．

程裕淇，陈毓川，赵一鸣，宋天锐．1983．再论矿床的成矿系列问题．中国地质科学院院报，第6号．

裴荣富，吴良士．1994a．金属成矿省演化与成矿．地学前缘，第1卷第3期，95～99．

裴荣富，吴良士，熊群尧．1994b．加强矿床模式普遍属性的研究，提高模式的找矿效应．见：赵一鸣主编．中国主要矿产资源形势分析与普查找矿策略．中国地质科学院矿床地质研究所所刊，第3号，8～22．

谢家荣．1963．地质历史中成矿作用的新生性、再生性和继承性．见：矿床学论文集．北京：科学出版社．

戴自希．1996．全球超巨型金属矿床（区）．见：中国地质矿产信息研究院编著．走向21世纪的地学与矿产资源．北京：地质出版社，35～42．

戴自希．1999．我国短缺矿产的问题和对策——铜．中国地质，第5期，45～49．

Chen Tingyu. 1989. Heterogeneity of the composition of the lithosphere and consanguinity of mineral deposits in eastern China. Journal of Southeast Asian Earth Sciences. 3（1～4）：333～339.

Cox D P and Singer D A . 1987. Mineral Deposits Models. U. S. Geological Survey Bulletin, 1693.

Laznika P. 1989. Delivation of giant ore deposits. 28th International Geological Congress. 2；268.

Petrascheck W E. 1965. Typical features of metallogenic provinces. Econ. Geol., 60：1620～1634.

Plimer L R, Lu J. 1995. Ar-Ar dating of multiphase mineralization associated with the Mole Granite, Australia. In：Pasava J, Kribek B, Zak K, eds.. Mineral deposits：from their origin to their environmental impacts. A. A. Balkem/Rotterdam/Brookfield, 497～500.

Robert R G and Sheahan P A. 1989. Ore Deposits Models. Geoscience Canada, Reprint Series 3.

第3章　全球变化和地质环境

3.1　全球变化

全球变化研究实际就是全球环境变化研究。它是80年代以后才兴起的，但现在已发展成为全球关注的综合性重大科学领域。国际上进行全球变化研究的，除国际地圈生物圈计划（IGBP）外，还有世界气候研究计划（WCRP）和全球环境变化的人类因素计划（HDP）。国际地圈生物圈计划系由国际科学联合会（ICSU）于1986年开始组织的，共包括7个核心计划和2个技术支撑计划，即：国际全球大气化学计划（IGAC），全球海洋通量联合研究计划（JGOFS），过去的全球变化计划（PAGES），全球变化与陆地生态系统（GCTE），水循环的生物圈方面（BAHCS），海岸带陆-海相互作用（LOICZ），全球分析、解释和建模（GAIM），以及数据信息系统（DIS）和全球变化的分析、研究和培训系统（START）。这项宏大的计划体系的应用目标是：增强对未来几十年至百年时间尺度上重大全球变化预测的能力，为国家一级和全球的资源管理和环境战略决策服务。

众多国家的地球科学家和科学组织积极地参与了全球变化的研究，把它列入地学计划。IGBP中的“过去的全球变化”或称“古全球变化”，即从过去的地质记录中提取全球变化信息为预测全球未来可能的变化提供科学依据，更成为当代地学研究的重要领域之一。本章即侧重于总结从地学角度研究全球变化的现状和展望。

3.1.1　研究现状

目前，国际上侧重研究第四纪，即约2.5 Ma以来地球气候和环境的变化，特别是过去几十万年和2000年以来这两个时段的气候、环境变化的原因和规律。之所以要集中研究最近2000年的地球历史，是因为这段时间是人类对地球影响最大的时期，同时也是人类历史资料与自然记录中对环境信息记载存在着重要重叠的时期。深入了解这段时间的气候和环境变化将为预测未来50～100 a地球系统的区域至全球尺度的变化速率提供极有价值的参考资料。而对晚第四纪的最后几十万年，重点是15万年以来的气候和环境进行研究，则能帮助我们弄清引起冰期-间冰期旋回变化的作用机制及其自然反馈，从而深化我们对引起全球气候变化的自然过程的认识。

除这两个重要时间段的研究外，科学家还对更老的地质时期（从全球变化角度气候和环境发生迅速和突然变化）的气候环境变化给予关注，如二叠—三叠纪泛大陆的气候变化、白垩纪的冷暖变化、缺氧事件和末期的大绝灭事件、上新世（5.30～1.60 Ma）的地球气候变暖。现已知上新世平均气温比现代高2～3℃，海平面比现今高30～50 m等。对这些重要时期的研究有助于加深对最近地质时期全球变化的背景及原因的认识。

古环境和古气候的变迁信息较好地保存在黄土-古土壤、冰心、湖泊沉积、洞穴碳酸钙沉积、风成堆积、火山沉积、红土以及海洋、河流沉积等地质体中，其中尤以深海沉积、黄

土-古土壤系列和极地冰心的地质记录成效最佳，被公认为是全球变化研究的重要支柱。

全球环境变化重点研究了地球系统的主要外源气候作用机制、地球系统演化的内部过程、快速和突然的全球变化及古气候与古环境的模拟，以及改进资料信息的获取技术和发展地层年代学等技术支撑系统研究。

90年代全球环境变化研究的进展大致如下：

1）全球环境变化的外源气候作用机制方面

研究主要集中在太阳内部变化产生的辐射调整和轨道作用力周期性变化引发的日射变化如何驱动控制气候发生相应的变化上。这种气候变化是长期的，一般在几千年到几十万年的时间尺度上，通过对深海岩心的$\delta^{18}O$记录和黄土记录等获得高分辨率的数据集试图弄清晚第四纪冰期-间冰期旋回的变化作用机制。结果表明，第四纪气候存在约20～100 ka尺度的周期性变化，这一尺度恰好与地球轨道参数变化周期相当。许多学者对深海、陆地的地质记录进行周期分析，证明了气候变化是对轨道参数变化的线性反应，这是古气候研究的一大成就。而且发现第四纪以来气候变化的主导周期有一个转变过程，大体上是从岁差周期主导转变为黄赤交角周期为主导，最后是以偏心率周期为主导。但当前对气候系统变化存在100 ka周期的起因及演化机制仍众说纷纭，有待更多的证据来证明这些假说。

2）对地球内部作用过程作为气候变化的驱动力的重要因子的认识在逐步加深

近年来已认识到岩石圈运动，尤其是地球内部作用过程对大气圈、水圈和生物圈的影响不可忽视。它对全球环境变化，如大气成分的变化，地表干旱化、地震、火山的活动、酸雨的形成、土地荒漠化等都起着重要的作用。

（1）板块构造运动对地球气候和环境的影响。大陆的拼合、碰撞和分裂，改变了大陆的分布及位置，极大地影响了大洋和大气循环，从而改变了陆地的气候和生态环境，构造运动还直接引起地形地貌的变化，从而影响气候的变化。

（2）地壳垂直运动（降升）对气候变化的影响比水平运动可能更强，最明显的例子为青藏高原和美国西部山脉的隆升❶。一些学者通过模拟研究认为，青藏高原隆升可以改变大气环流和大洋环流形式，特别是东亚季风的形成和发展影响了北半球甚至全球的气候和环境。现确认高原隆升是晚新生代气候变化的主要驱动力。美国学者研究认为，内华达山脉的抬升导致大盆区近500年的干燥气候。

（3）巨型地幔和火山活动放气作用对全球变化的影响。火山喷发把大量固、液、气体从地球深部排放到大气圈中，从而改变了大气化学组分和日照率。火山作用产生的气溶胶，特别是硫气溶胶（主要是SO_2形成的H_2SO_4）对地面温度的影响，它能降低对流层下部的气温。火山喷发后的两年内温度可能会下降0.2～10℃。火山作用的气候效应被北美高山冰川波动、格陵兰冰心记录，甚至树木年轮生长的研究所证实。但火山活动引起区域性还是全球范围的温度变化，还有待进一步弄清火山喷发的时间、范围和气候的响应等许多问题。

近年来，巨型地幔柱已引起地学家的广泛兴趣，他们开始注意到这一地球深部过程在全球变化中的重要作用，并认为地幔放气（CO_2）会引起温室效应，岩浆活动迅速扩张引起全球海面上升等。有人提出中白垩世气候变暖、温度上升的原因与巨型地幔柱迅速大量排放CO_2有关（CO_2浓度为现代值285×10^{-6}的3.7～14.7倍），而不仅是因为古地理的变化

❶ 刘树臣．1994．全球变化地质学的主要进展及我们的对策．见：中国地质矿产信息院编著．形势与挑战．

即大陆重新配置所致。地幔热柱来自核幔边界 2900 km 深处，在地表形成许多热点和火山。陆上火山喷发出的火山灰遮蔽日照而致降温，而大洋中脊山带上的水底火山喷发出大量的CO_2。构造地震活动在地质历史时期以及现代从未停止，有些还相当强烈。中国学者通过卫星遥感的红外谱图发现临震前在10^4 km^2级的大面积范围内向大气层大量急速释放CO_2，不过其定量研究还远远不足。

（4）全球碳循环研究的新进展。由于大气CO_2浓度上升造成的温室效应对全球变化产生重要影响，因此除了减少人类活动工业化排放到大气中的CO_2量以外，查明地球内部成因的CO_2的气源，即全球碳循环已逐渐成为重要研究课题。近年来岩溶地质学家通过研究，发现全球碳酸盐岩含碳量为10^{16}t，占地球总碳量 99%以上，在全球碳循环中占有重要地位。它不仅通过表层岩溶作用从大气中回收CO_2，而且还可随着碳酸盐钙华的沉积而释放CO_2，从而直接参与全球的碳循环，对气候变化有重要影响。中国袁道先等人估算了通过岩溶作用回收大气碳的通量（以CO_2形式）全国为3.83×10^6t/a，全球为6.08×10^8t/a。日本估算全球碳的回收量为2.2×10^8 t/a。估算结果虽因参数不一而有差别，但都在同一数量级上。在中国、土耳其、意大利等岩溶区的测试验证，有浓度高达 23%～90%的幔源CO_2通过活动断裂向大气释放，并伴随大量钙华快速沉淀。在 30 届国际地质大会上还报导了在西班牙南部某地，由于对碳酸盐岩含水层的过量开采，引起深部浓度达 85%的CO_2突然入侵的实例。可见，除人类活动影响外，地球深部CO_2正通过地热区、火山活动及活动断裂带不断释放，直接进入大气促进了温室效应或储存于盖层成为气田。

（5）地球系统还有一些内部过程对气候变化有驱动作用，如CO_2、CH_4及N_2O等主要活跃痕量气体的作用；冰盖消长与海平面变化的影响等。目前这些都已被 PAGES 列为专题研究。

（6）天文事件如彗星或小行星撞击可能诱发的古气候变化，以及地质历史时期中，如认为白垩纪—第三纪间有地外事件发生，重大的地质灾变导致生物大绝灭等，也是全球变化研究中需要考虑的。

3）快速和突然的全球变化原因和作用机制研究的新进展

科学家们普遍认为气候环境的演变主要受米兰科维奇轨道参数（偏心率、地轴倾斜度和岁差）的控制，还有地壳运动、海陆分布等的影响，但对突发事件（突然变冷和突然变热）的原因和机制及其响应却不甚清楚。这种非轨道力的变化机制有可能是大气环流和风场变化引起的。因此探索和重建重要时期的古气候和环境，对于预测未来 50～100 a 可能的变化将提供重要依据。近年来根据海洋沉积物、冰心和黄土等地质记录发现气候系统存在着不稳定性，它表现为气候以很快的速度（十几年到几十年）从一种状态变化到另一种状态。现在对末次冰期-间冰期发生的一些气候事件，包括新仙女木事件（YD），Heinrich（H）事件，Dansaard-Oeschger（D-O）旋回（颤动）等进行重点研究。研究结果表明，YD 事件（1.1 万年前气候突然变冷）已在不同区域不同记录中，如海洋沉积、格陵兰的冰心记录，阿拉斯加的孢粉记录，北美的冰川记录等都有发现。甚至太平洋地区、亚洲中国和南半球委内瑞拉也有记录。Heinrich 事件是指在北大西洋沉积中发现冰漂碎屑周期性增加的过程，又特指末次冰期期间普遍存在的 6 次大的冰漂碎屑沉积事件。它是由于冰山崩塌、涌出，导致北大西洋海水温度、盐度降低而气候变冷。H 事件在北太平洋深海沉积、中国黄土堆积、南美山地冰川等各种记录中都有显示。D-O 旋回距今 22～37 ka，有 10 次气候突

变（突然升温降温）。由上述情况可知，YD 事件、H 事件、D-O 旋回很大程度上都是一个全球性气候事件，其产生原因可以用冰盖融化、北大西洋环流强度的变化来解释。此外，低纬度水文循环也可能引起气候系统的不稳定性。

关于冰期-间冰期的转换和南北半球气候变化耦合（同时发生）的机制，G. H. Denton 等提出了“海面变化-冰盖波动锁定”的解释，以后 W. S. Broecker（1989）进一步认为是大洋传送带的开-合过程导致的，可能与北大西洋大洋环流有关。但目前还没有一个假说能作出满意的解释。

万年以下时间尺度的气候变化事件也开始在一些地质记录中被检出。如格陵兰冰心化学分析结果显示，自全新世以来存在明显的千年尺度的波动。最近这种波动尺度在中国黄土记录中以及赤道、高纬度地区、极地，从海洋到陆地的许多沉积记录中都有发现。看来这种短时间尺度气候事件也具有时间性。

近年来大范围的气候异常引起了科学家们对厄尔尼诺-拉尼娜现象的关注。所谓“厄尔尼诺”是指热带中、东太平洋表层海水大面积升温，而“拉尼娜”则相反，是指海水大面积降温。20 世纪初，人们已开始注意到厄尔尼诺对海洋生态环境的影响。60 年代认识到厄尔尼诺给全球气候造成重大影响，主要表现在热带东太平洋地区洪水泛滥和热带西太平洋地区荒芜干旱。研究表明，从 50 年代至今共发生 14 次厄尔尼诺。但现在发现厄尔尼诺的发生频率近年来逐渐加快。80 年代有 2 次，而 90 年代已 3 次，并以 1997/1998 年为百年来最强的一次，使全球一些地区出现严重干旱或洪涝。拉尼娜现象自 50 年代至今发生了 9 次。专家们已确认厄尔尼诺-拉尼娜现象是热带海洋和大气之间相互作用、相互影响的结果。其发生频率的加快是否与全球升温有什么联系认识尚不一致。但厄尔尼诺-拉尼娜的影响已成为全球短期气候异常的主要因素是毋庸置疑的。

据最新的研究报导，从厄瓜多尔安第斯山脉上拉古纳湖底 10 m 长的沉积物分析显示，厄尔尼诺历史可追溯到 15 ka 前，而在近 5 ka 来出现频率加快，大约每隔 2～8 年发作一次，而不像在地球气温较高时那样每 15～35 年发作一次。

4）天然气水合物对全球变化的影响和反馈成为不容忽视的新领域

天然气水合物在本世纪 60 年代以后陆续发现，但最初仅作为一个重要的潜在能源看待。而 80 年代后期科学家们才发现它与全球气候变化有着密切的关系。天然气水合物是水的晶格（90%）充填了天然气分子而形成的冰状固体，天然气成分以甲烷为主。天然气水合物的含碳量很高，据粗略估计全球可达 1×10^4Gt，因而认为它是地圈浅部的重要碳库，是全球碳循环中的重要组成部分。天然气水合物在自然界中只能形成于甲烷来源丰富的富有机质沉积物或油气富集区，它在低温高压条件下才能稳定存在。一旦条件变化，如温度增高或压力降低天然气水合物即会分解，向大气释放大量甲烷，产生温室效应，从而对全球气候产生重大影响。反之，在温压条件适宜时，则吸收甲烷形成天然气水合物。目前的研究表明，天然气水合物的蕴藏量极大，因而通过甲烷的释放和吸收对全球变暖产生重大影响。

天然气水合物与地质历史时期产生的海底滑坡可能有联系，这被解释为由于天然气水合物的不稳定性而释放大量的甲烷所形成的充气层，降低了沉积物的强度所致，同时还伴随海平面下降事件。随着对天然气水合物研究的深入，它在全球碳循环中的作用，以及对全球环境、气候变化影响的强度、机制等的认识将进一步提高。

5）对 150 ka 来和最近 2 ka 时间段地球环境与气候的研究

（1）150 ka 时间段主要是研究晚第四纪的冰期-间冰期旋回，时间分辨率至少要达到 1 ka。这方面的重要成果是根据格陵兰和南极冰心的连续记录，恢复了 160 ka 以来的气候变化史，特别是大气组分的变化；同时对 18 ka 来的气候变化，进行了每隔 3 ka 时段的气候模拟，模拟结果与地质记录一致；还对晚更新世以来的海面变化机制和规律进行了探讨。

在第 30 届国际地质大会上报导了新的全球变化的记录材料。中国岩溶地质研究所通过对桂林一个长达 1.22 m 的石笋，在研究其内部微层理的沉积学特征基础上，用 AMS ^{14}C 法测年配合 U 系稳定同位素地球化学综合研究，揭示了中国南方 36 ka 以来古环境变化的 3 个气候旋回，每个旋回持续 3 ka 左右，在暖湿期分辨率可达 0.1 ka，在干冷期也可达 0.5 ka。美国 Iowa 州冷水洞，英美合作的苏格兰 Uamkan Tartair 洞，美国人在非洲博茨瓦纳 Drotsdy 洞通过石笋研究古气候的变化也获得较高的分辨率，但所用石笋较小（高仅 16～40 cm），时限范围限于全新世。

在海陆对比方面，加拿大科学家将中国黄土-古土壤序列与最新的海洋钻孔 ODP Hole 810c 高分辨记录进行了周期对比。美国与俄罗斯科学家利用先进的活塞式钻具在贝加尔湖打出的岩心，记录了过去 350 ka 北亚的气候变化，与著名的 SPECMAP 海洋氧同位素曲线进行对比，证明大陆与海洋在晚更新世主要的气候事件是对应的。

对于 150 ka 来南北半球的气候变化及其机制方面，刘嘉麒报导了他们在中国渭南黄土剖面建立的高分辨率的古气候时间序列与深海沉积物氧同位素序列和南极、格陵兰冰心的古气候记录有很好的可比性，据此确定了末次间冰期的起始时间为距今 128 ka，结束时间为距今 74.2 ka，末次冰期最冷期在距今 20～18 ka，从而为全球变化对比提供了重要数据。

由于单一的古气候记录（大陆、海洋或冰心）不能完全代表全球性古气候，因此要正确了解全球气候变化过程，还必须综合区域性的、多学科的证据，深刻理解区域环境系统对气候变化的特殊响应，及不同地区或系统之间的相互关系。为此，IGBP 中核心项目之一 PAGES 组织了一个国际性研究计划——PANASH（南北半球古气候计划）[1]，这是研究南北半球的气候机制和耦合关系的一个重要步骤。PANASH 组织三条跨越两个半球的极地-赤道-极地断面（图 3.1），即 PEP-Ⅰ美洲断面；PEP-Ⅱ澳大利亚-亚洲断面；PEP-Ⅲ欧洲-非洲断面。第 30 届国际地质大会交流了最新研究成果，不少研究根据植被变化及地质记录恢复了南半球一些地区古气候的长期变化。如 T. C. Partridge 综述了过去 200 ka 来南非的气候变化，研究结果表明，南北两半球在气候变化中具有很强的耦合性。

通过不同的地质记录，反映了在第四纪时期古大陆环流不同分支的演变特征及其所导致的环境变化、水热、风场格局的变化。刘东生在大会上论述了亚洲不同季风系统与西风环流的相互作用，并提出了东亚古季风气候驱动因素和机制方面的概念模型。对黄土沉积序列，中国学者通过冬、夏季风气候代用指标的研究，分析了东亚古季风的变迁过程和特征。

（2）对最近 2 ka 时间段的研究。由于它对预测未来 50～100 a 全球变化的重要性，对时间的分辨率要求达到 1～10 a。冰岩心、岩溶沉积物、树轮、湖泊沉积和珊瑚沉积的地质

[1] PAGES. 1995. Paleoclimates of the Northern and Southern Hemispheres: the PANASH Project, the Pole-Equator-Pole transects. PAGES Series 95-1, 1～92.

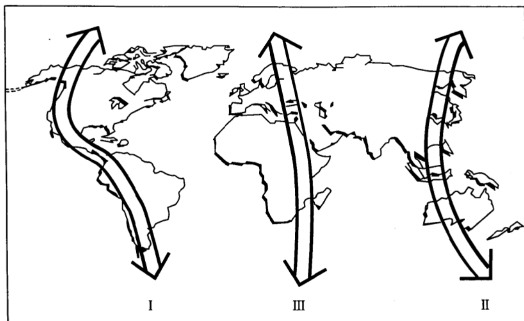


图 3.1 PEP 断面的位置

记录甚至能分辨到年和季节，因而越来越受到重视。在第 30 届国际地质大会上，中法合作研究结果表明，通过对近 2 ka 以来中国、非洲等季风气候区的气候变化记录对比，发现这些地区干、湿变化大致同步；在全新世时期中国和北非现代沙漠的扩张与收缩也是同步的，看来变化受控于同一因子。意大利中部最近几十年来，存在变暖趋势，接近 1℃，而水文地质系统对气候变化的响应，通过数学模拟研究，河流径流量将趋减少。

中国科学家对青藏高原西昆仑山古里雅冰心（长 309 m）中 $\delta^{18}O$（作为温度指标）、冰川累积量（作为降水量）和 Ca（大气尘埃）等指标的研究，高分辨率地恢复了过去近 2 ka 来的气候环境变化。中国学者还通过不同的地质记录重点研究了中世纪温暖期和 15～18 世纪的小冰期。

6）人类的社会工程活动在近代全球变化中的影响

除了自然作用过程作为影响全球变化的因素之外，还叠加了人类活动的作用和影响。现在已开始把人类活动作为一种重要的地质营力，改变着地球的气候和环境。如大量 CO_2 气体的排放造成温室效应，森林砍伐，土壤侵蚀，沙漠化，工程活动，酸雨，矿产资源、能源的采掘、加工，环境污染等等，使地球生态系统日趋恶化。据统计，当今世界性工业燃耗大量能源，向大气层排放超量的 CO_2、H_2S 及其它 30 多种废气，每年约 50×10^8t。由这些废气形成的"温室效应"越来越影响全球的增温。过去 100 a 中气温最暖的 6 个年份都在 80 年代中期以后。据测，1992 年平均气温比 1951～1980 年期间的平均气温高 0.19℃，1993 年高 0.27℃，而最炎热的 1990 年又高出平均气温 0.4℃，可见人类活动的影响程度。

研究人类活动的影响进行起来比较困难，其原因一方面是测量、记录的时限、资料有

限；另一方面是如何将自然作用与人为作用从地质记录中区分开来有难度。后者的影响是局部的，还是区域性的？此外有些影响反馈效应和人们对其后果的认识往往是滞后的，需要预测评价和时间的验证。

7）区域地质环境系统对过去各种气候驱动因子的响应

刘东生在第30届国际地质大会主题报告“中国地质环境与全球变化”中，重点探讨了新生代以来中国地质环境与全球变化的联系，提出了大量地质证据，表明亚洲大陆干燥度在逐步增加。施雅风指出，青藏高原自中更新世以来上升3000～3500 m，对周围的山地（昆仑）、沙漠（塔里木）以及长江等河流带来一系列影响：气温、地貌的变化、河流动力加强与携载物加多等。水文地质工程地质研究所通过构造、气候、人类活动环境分析三要素建立的空间模型，讨论了中国北方末次冰期环境演变的历史，指出在全新世大暖期的平均温度比现代高1.9℃，降水量比现代多195 mm，而18 ka前的最冷期，平均温度比现代低11.33℃，降水量比现代少165 mm。东非肯尼亚Sonachi湖泊沉积高分辨率记录研究表明，非洲干旱区在最近数千年来总的是向干旱环境演化。而澳大利亚西部地区的干旱化，据研究，大致在0.78 Ma以后才出现。

陆地水圈循环对气候变动的响应敏感，且对地球气候和环境变化起着调控作用。中国通过自西向东横切青藏高原、黄土高原至东部平原之间的大剖面，研究了各不同单元自晚更新世以来，古气候的演变及其对水环境的影响。在大陆水文循环中，通过对地下水流量的定量研究，K. M. Hiscock等（1992）再造了英国14×10^4a的古水文演化，尤其是全新世的水文演化。美国学者根据密西西比河道大小、沉积物特征，再造了该河上游地区高频率洪水的幅度的长期变化史。

全球变化也直接影响到海平面的变化。因此海平面在地质历史时期的变化及发展趋势是全球变化重要研究内容之一。尤其在人类历史时期海面变化直接影响海岸带的经济发展和人类生存环境，因此海面变化更引起人类的关注。王颖总结了中国海平面自盛冰期至全新世的变化情况：在近2 ka晚全新世内，由于8～10世纪为暖期，11世纪时海面上升1.5 m，以后气候较冷，海岸平原堆积，海岸阶地形成。本世纪海面上升速率为2～3 mm/a，平均为1.4 mm/a，并有持续上升趋势。

但是海面变化是否与气候变化成正相关关系，即气候变暖，海面升高，反之则下降，对此学者还有不同看法。尤其在区域范围内海平面的升降还可能受到构造作用和人为作用的影响。如由于地下水和油气的开采，建造大坝使三角洲系统缺少沉积物而海岸沉降。目前早已摒弃“全球统一海平面曲线”的提法。甚至认为，海平面并不平。科学的提法是海面变化。但气候变化仍是驱动海面变化的主要因子。1993年10月世界海岸会议95个国家的科学家认为，到2025年，由于极地冰川的消融和海水增温使水体膨胀等因素影响，全球海面将升高30～50 cm，并预测到2100年可能会升高1 m。

3.1.2 全球变化研究展望

全球变化研究由于全世界的关注取得了很大的进展，对未来全球气候变暖趋势作出了预测。联合国政府间关于气候变化小组委员会（IPCC）在1992年报告中指出，基于大气层中“温室气体”CO_2含量将增加一倍，到2100年地球表面平均气温将升高1.5～4.5℃。气象专家预测，到2025年气温上升1℃，到2050年将上升1.5～2.5℃，到2100年将上升2.5～4.5℃，并对相应发生的全球环境变化和社会影响（旱涝灾害、荒漠化、海面上升、淡水

资源匮缺、陆地生态系统恶化等）作出评估。但是由于全球尺度问题的错综复杂，时间跨度大，地域广阔，有许多不确定因素、机制和规律还未被人们所发现和认识。因此，全球变化研究还有待吸引众多学科的科学家、国家和组织共同攻关，可望在以下几方面取得进展：

1）综合性、多尺度、长期连续的全球观测系统和数据信息系统的建设，这是研究全球变化的基础。现国际上正发展三个相互关联的全球气候、海洋、陆地观测系统，此外还有专门性的、区域性的和国家级的观测系统。美国与有关国家合作拟于1998～2014年间发射一系列极轨卫星和低倾角卫星组成的地球观测系统（EOS），它将提供对陆面、生物圈、固体地球、大气和海洋的至少15a的全球观测。为保证研究全球变化所使用的数据信息质量、加强数据获取、交换的机制和数据资源的共享，需加强数据组织和科学研究计划之间以及各数据机构、中心的配合与协调。为此，1997年国际IGBP的数据信息系统（DIS）和世界数据中心（WDC）共同研讨数据的管理和共享问题，如WDC如何满足IGBP核心项目对数据的需求，对现有的数据网络系统如何进一步改进和扩充等，提出了要加强海洋生物学、海岸带、水文学、生态学、古气候与古环境以及土地和社会经济等方面数据的使用和改进。此外，还强调了WDC应发展一些跨学科的综合性数据集等。

2）地球内部各圈层及表层的动力学研究对全球气候环境变化的影响。目前地球科学各分支学科已逐步将自己传统的研究焦点与全球变化结合起来。第四纪地质学从研究过去地质历史中的重要事件和演化过程来预测未来全球变化，获得了新的活力和意义。地幔和地壳中的CO_2通过火山喷发和强烈的地震活动进行释放及全球碳循环CO_2的源汇问题，大陆地壳动力学的演化、板块运动的驱动机制、造山运动、岩石圈的结构和演化、深部地质作用、地球轨道参数变化周期的变异等对全球气候变化的影响研究将获得进一步加强。

值得提出的是，最新研究认为，地球存在着圈层差异旋转，即地球外层自转减速，内层自转加速。1996年通过地震波测量，发现地球内核旋转速度每年比地壳地幔快1°。这种圈层差异旋转如何影响太阳辐射量的变化，从而控制地球内核能量的释放，产生地球轨道和太阳轨道的全球变化的响应，向地球科学提出了新的挑战。

3）提高研究古气候、古环境变化的时间分辨率和尽可能长的时间序列，发展新的技术方法和测试分析手段。除原来的冰心、黄土等重要支柱外，新发展起来的树轮、湖泊纹泥、珊瑚、洞穴沉积等也是获取高分辨率气候记录的重要载体。近年来发现从泥炭纤维中也可提取古大气CO_2浓度、古温度、古湿度等重要气候信息。吉林金川泥炭纤维素的$\delta^{18}O$记录以20年的分辨率描述了过去5000多年气温的变化，甚至通过$\delta^{18}O$记录还获得了太阳活动水平变化与地表温度变化的相关关系。

各种地质、气候突变事件发生的时间、速率和古气候、古环境的再造都要求一定精度的测年技术和方法。目前除^{14}C法外，还有K-Ar（^{40}K-^{40}Ar，^{40}Ar-^{39}Ar）法，铀系法，裂变径迹（FT）、电子自旋共振（ESR）、氨基酸外消旋（AAR）、热释光（TL）和光释光（OSL）等。根据不同时段、不同测年物质采用不同方法。对珊瑚骨骼的测年精度可达年或数年，对树木年轮的精度可达年或季。最近应用AMS ^{14}C（加速质谱）测年法，在湖泊、岩溶沉积的分析中，建立了高分辨率的时间系列。Os，O等同位素在沉积物中的比值记录，如$^{18}O/^{16}O$，$^{87}Sr/^{86}Sr$，$^{187}Os/^{186}Os$等可以提供全球地质环境变化的许多信息。如在末次冰期水中$^{18}O/^{16}O$比值快速变化，显示冷暖气候交替频繁，气候状态很不稳定，在100 a内温度可

改变幅度约 5～6℃。

对古气候的定量研究有采用模拟方法，用概念法再造古大气环流和降雨分布，用严格的数值法-能量平衡模式（EBM）和一般循环模式（GCM）再造地质环境。还有用岩性和古生物资料推断古气候。最近生物分子法已开始成为再造古气候古环境一种新的重要手段。尤其是 U_{k37} 确定海水表面温度（SST）再造中，可获得很高的分辨率，这为研究小于千年尺度的全球变化提供了条件。

在第 30 届国际地质大会上反映的新的研究方法有利用澳大利亚、非洲、北美和亚洲浅钻孔温度记录研究全球地表温度变化的百年趋势。这种记录不但容易获得，而且比其他替代性温度指标更为直接。

4）青藏高原隆升对全球环境和气候影响的研究。众所周知，青藏高原自约 40 Ma 前开始隆升，全球气候和环境出现了多次大的变化。尤其是进入第四纪以后，年平均隆升率为 1 mm。距今 2.4～2.5 Ma 和距今 0.6～0.7 Ma 的隆升导致了大气环流的突然变化，极地降温，形成大冰期。高原的隆升对亚洲甚至全球环境变化的影响至今尚未停止，因此加强对高原隆升的成因和机制的研究，不仅能揭露地球深部作用的过程，还可以进一步弄清对周边环境所产生的影响。

5）人类活动对全球变化的影响研究。1996 年 4 月在德国举行的国际地圈-生物圈计划（全球变化）第一届大会指出，在全球变化研究中，特别需要重视人类活动对全球变化的影响。人类活动对土地的利用、对海岸带的开发、工业废气的排放等等都在影响着环境和气候。1995 年 IGBP 和 HDP（全球环境变化人文计划）共同拟定了“土地利用/土地覆被变化科学研究计划”。这主要因为土地利用和土地覆被变化在全球环境变化和可持续发展中占有重要的地位。人类对与土地有关的自然资源的作用，改变了土地的覆被，从而影响全球环境的变化。反之，全球环境变化又会通过气温、降水、干旱、土地退化等影响土地覆被。这里强调的是如何控制人类经济活动对土地利用的影响。许多国家如美、日和一些国际机构如联合国环境署已认识到，在预测未来 50～100 年的土地覆被变化趋势中，人类的土地利用活动将起最主要的作用。已开展了用高分辨率雷达、遥感等方法监测分析土地覆被的时空变化，从而采取相关的对策。现有人提出要建立“人地系统动力学”，研究地球表层人地系统相互作用动态变化的规律，为区域可持续发展模式的制定提供科学依据。

3.1.3 我国全球变化研究现状及展望

由于我国具有独特的地质和地理条件，以及在全球所处的重要地理位置，我国地球科学家敏锐地认识到，积极参与全球变化这一前沿科学领域研究对我国社会、经济可持续发展的现实意义和地球科学发展的推动作用，不仅参与了 IGBP 有关核心项目的研究，如“过去全球变化”，在其他领域，如海洋、土壤、土地利用/土地覆被、数据信息系统建设等也积极开展了研究，取得了显著的成果，为全球变化研究作出了重要的贡献。总体来说，我国的全球变化研究紧紧瞄准科学前沿，有些方面还走在世界的前沿。

我国的干旱和半干旱区是研究全球变化的关键地区，因此组织了“干旱半干旱区 150 ka 来环境演变的动态过程及发展趋势”（1992～1997）的研究。通过有代表性的环境地质剖面和东西向大断面，建立了高分辨率黄土、湖泊等陆相沉积物古气候记录的时间标尺，重建了 150 ka 来环境演变序列及动态过程，揭示出西太平洋边缘的海洋因素是冰期时我国内陆干旱的原因之一，提出了东亚古季风变化动力机制的概念模型，并运用“时域组合模型”等

数学手段，对我国北方干旱半干旱区未来演变趋势做了统计学的外推。这项成果被认为列入世界前列。

“中国北方晚更新世以来地质环境演化及其未来生存环境变化趋势预测”项目（1992～1995）重点研究了晚更新世以来，特别是全新世及最近 2～3 ka 以来的环境、气候演变，研究在构造运动、气候因素及人类活动影响下，陆地水系统和土地系统发生、发展和变化趋势，重塑和编制了青藏高原-黄土高原-华北平原至渤海沿岸东西大断面的古气候、古环境，提出了北方 20 ka 来古气候变化模式并预测今后 50 a 以地下水资源和土地资源为主的生存环境。

在南北半球古气候计划（PANASH）3 条南北半球研究断面中，我国是 PEP I 断面的主要负责人之一。这条断面包含了许多独特的环境，如继续不断隆升的青藏高原，世界上最大的海洋暖池——西太平洋暖池，最大的季风区——亚洲季风区，最大的中纬度沙漠等，还有保存良好长序列记录的黄土、洞穴、高原湖泊沉积等优势支柱。可望在高分辨率重建古环境变化历史和古季风环流作用机制等重大问题上有突破性的进展。此外，在前述全球碳循环的源汇研究方面，中国揭示了通过碳酸盐岩岩溶作用回收大气碳的重要过程并作了定量的估算。

有关全球变化数据管理方面，我国已参加了 WDC（世界数据中心），并相应在 WDC-D 中建立了 9 个学科中心：海洋、气象、地质、地震、冰川冻土、天文、地球物理、空间物理、可再生资源与环境学科中心等，它们已为全球变化研究提供了许多诸如海平面变化、高亚洲寒区地理信息系统、资源和环境方面的数据和资料服务。

10 年（1985～1995）来，据统计，我国全球变化研究项目已达 350 项左右，其中一些跨学科的重大项目，如“全球气候变化预测、影响和对策研究”，“我国未来（20～50 年）生存环境变化趋势的预测研究”，“灾害性气候的预测及其对农业年景和水资源的影响”。这些研究成果都获得了国内外的高度评价。

结合国际全球变化的研究重点方向和我国的优势和特点在已取得的富有成效的研究基础上，应在以下几方面继续努力，以求有更进一步的提高和突破。

(1) 大力支持南北半球古气候耦合机制已开展的 PEP I 计划研究。现国家自然科学基金“九五”重大项目“我国季风区古环境变化机制及其与全球变化的动力学联系”已列入 PEP I 执行计划之中。这对加强古环境的研究是一个重要措施。

(2) 青藏高原和极地对全球及邻区变化的影响研究。青藏高原的隆升已极大地改变了亚洲大气环流的形势。中国西北部进一步变干旱，东部湿润。青藏高原现仍在继续隆升，又处于中国境内，我国地学家应进一步研究高原的隆升机制，以预测对中国地质环境和气候将产生的变化趋势，乃至对全球变化的影响。

(3) 继续发挥我国全球变化地质记录重要支柱的优势作用，加强黄土、岩溶洞穴沉积、湖泊沉积等地质记录与古环境变化的研究。

(4) 全球变化研究的数据信息系统建设和数据共享。现我国除 9 个学科数据中心外，还有一些观测台网，如中国生态系统研究网络包括了 29 个野外研究台站以及 4 个分中心和 1 个综合中心。在此基础上，进一步完善遥感与地理信息系统、海洋观测系统，建立海洋资源、环境数据库和管理信息系统等。数据资源共享难度较大，更需加强管理协调以便充分利用，以免工作重复，造成浪费。

3.2 环境地质与地质灾害

环境地质学（广义包括地质灾害）可以说是一门新兴学科。随着人类工程-经济活动的增加，工业化程度的提高，城市建设不断扩大，整个社会经济的迅速发展，给人类生存的地质环境带来巨大的变化和影响，产生许多始料未及的环境地质问题，使环境质量日益恶化，影响了人类的生存和社会的发展。沉重的代价和教训促使人们逐渐认识到环境问题的重要性，人类的经济活动必须与环境相协调。因此以研究人类工程经济活动与地质环境之间相互作用和相互影响为任务，从而合理利用和保护地质环境，达到人类社会持续发展为目的的环境地质学（包括地质灾害学）成为地球科学的热门学科，获得世界的关注。

当前，全球十大环境问题为：气候变暖、臭氧层破坏、生物多样性减少、酸雨蔓延、森林锐减、土地沙漠化、大气污染、水体污染、海洋污染、固体废弃物污染。这十大环境问题有一半是与地质环境直接有关的。有些环境问题如气候变暖，虽然普遍认为是 CO_2 过度排放导致温室效应增加所致，但是大环境的全球性气候变化的地质背景不能忽视。正如现代全球变化研究认为，气候变化的主要驱动因素与米兰科维奇旋回（地动参数）有关。同时由于气温变暖、冰川融化，海面有逐年上升趋势，因此环境问题的解决和环境的保护离不开环境地质学的知识和参与。

3.2.1 主要环境地质和地质灾害问题研究现状

从广义上讲，环境地质问题包括地质灾害在内。为了便于区分，把地质作用造成的灾害如火山活动、地震等作为自然地质灾害；而人类活动诱发的地质灾害，如地面沉降，地下水污染等则纳入狭义的环境地质问题的范畴。当然，自然规律是十分复杂的，有些地质灾害是两种作用，即地球的内、外动力作用，再加上人类活动的作用造成的。如地裂缝、滑坡等。因此这只是相对的区分，并不是在任何情况下都能截然分开的。

1）大江、大河开发中的环境地质问题

在大江、大河兴建水利枢纽工程，使地质环境（岩土体环境、地应力环境、水环境）发生变化，导致库岸崩塌、滑坡、浸没、水库渗漏、淤积甚至可能诱发水库地震等及其它次生地质灾害发生。目前世界上已有 100 余座水库发生了诱发地震。研究多围绕灾害的成因机制、预测评价进行。中国的长江、黄河，巴西的亚马逊河、美国密西西比河、俄罗斯伏尔加河等的开发中，都曾有各自不同的环境地质问题发生。近年来开始重视对工程兴建后造成流域内生态地质环境的变化。在第 30 届国际地质大会上交流了这方面的研究成果。中国学者提出在江湖整治和长江中下游防洪中一个重大的环境地质问题是：洞庭湖地质环境系统由于受到构造沉降、沉积物的淤积和人为围垦因素的相互作用，很可能湖区将会继续逐渐缩小，以致消失。黄河三门峡水库淤积造成环境恶化，无法达到原设计效益，虽然后来采取泄洪排沙等措施，但已造成很大的影响。这是个沉重的教训。

2）核废料处置的环境地质问题

核能的利用在各国能源结构中的比例近年来有所上升。现实的地质问题就是核电站的选址及核废料的处置库选址。对于后者，尤其是高水平放射性废物处置库的环境水文地质、工程地质条件要求很高。德国、中国、瑞士、日本等国都开展了这方面的研究工作。他们提出除了考虑场址的地壳构造稳定性，介质的低透水性和一定的对核素吸附滞留能力外，对

地震的影响也要考虑。

高放核废物的泄漏主要原因是和地下水接触。在处置后长达 10^4～10^6 a 内高放核废物仍保持其有害性质。在此期间北半球有可能经历几次冰河期，地表水、地下水及其物化性质都将发生变化，对此英国学者作了重要的探索。Boulton G. S 利用过去几次冰河期的数据建立了冰河作用下岩石水力学和地球化学模式，重现了冰河期地表水加速入渗，地下水流速及物化性质的变化，并探讨了处置库主岩在冰河作用下的长期特性。King-Clayton Louisa M 等和瑞典合作，研究了今后 100 ka 内北欧四次冰河对一个假设的瑞典南部深度为 500 m 的核废料处置库的安全影响，进行了预测性的探讨。这里涉及到全球和当地的海平面变化，冰盖厚度、永久冻土厚度的变化以及地形变化等问题。美国新墨西哥州 WIPP（Waste Isolation Pilot Plant）开展了军用超铀废物处置库的研究。处置库主岩为岩盐，深度 300 m 左右，重点研究不同地质概念模式对处置库性能预测的影响。

低渗透性介质一般选择结晶岩、粘土和蒸发岩等。比利时、韩国学者对粘土的主要特性（如吸附性）以及处置的可行性和安全性进行了研究。中国从 80 年代中期开始研究高放核废物的处置。

3）地质资源、矿业开发的环境地质问题

采矿活动不仅造成地表破坏，引起地面沉降、塌陷或边坡崩塌、水土流失等灾害，还因废渣、尾矿堆放造成土壤和水以及大气的污染。捷克西部波希米亚地区因采矿引起土壤、水和空气的污染。从发电厂排出的废物酸化了土壤和地表水，每燃烧 1 t 煤就会向大气释放 60 kg 的 SO_2。1987 年捷克全国就有 2.9×10^6 t 排放物，此外还有各种痕量金属，结果之一是本地的云杉完全枯萎，另一结果是当地地表水中铍的含量增加。溶解法开采铀已引起了严重而复杂的环境问题。乌兹别克斯坦地质科学院开展了对 KEMIN 采矿联合体的多金属矿、稀有金属及稀土矿周围地区被重金属污染的研究。一些西方发达国家如加拿大 80 年代便开始重视矿业开发环境的研究，如减轻酸性排水和发展生物工程技术，从废水中除硒、铜等，取得成效。美国、加拿大、澳大利亚等国还制定了相应的矿业环境法规以加强环境管理。德国学者指出，当今采矿搬运量为 17.8 km^3/a，远远超过先前全球河流搬运物 4.5 km^3/a。这说明人类采矿活动对环境影响是原来风化作用的 4 倍。据不完全统计，中国因采矿塌陷造成环境破坏的城市近 40 个。因采矿产生的大量废水、废液未经处理自然排放，处理率不到 5%。固体废物、尾矿的治理量也很低。矿山环境恶化趋势尚未得到有效遏制。

工业区排放的大量工业废气，尤其是 SO_2，NO_2 等与水汽结合，降落成为含硫酸、硝酸腐蚀性很强的“酸雨”（$pH<5$）。它不仅使地表水水质变坏，土壤酸化，还渗入地下污染地下水。世界现有三大酸雨区：北美酸雨区、欧洲（北欧）酸雨区以及中国西南华南酸雨区。前两地区正在治理。中国 SO_2 年排放量约 1800×10^4t，超过美国现在水平（1600×10^4t），雨水中 pH 值已低于 4.5。据 1995 年的分析观测资料，我国酸雨面积逐渐扩大，已占国土面积 29%，出现频率也在上升，个别南方省市还有年平均 $pH<4.0$ 的地区。

4）城市建设的环境地质问题

城市建设牵涉到土地利用、地下资源开发、水资源（主要是地下水）利用和环境污染等环境地质问题。香港、加德满都和麦德林等城市，由于在不稳定斜坡上大量建筑，发生滑坡和其它块体运动，遭到很大损害。

现在世界各大城市如何安全处理大量的固体废弃物（垃圾）、有毒废液和工业废料已成

为一个重要问题。一些主要城市每天垃圾产生量东京高达 3×10^4t，纽约、巴黎也各有 1.4 $\times10^4$t 和 0.9×10^4t，不过这些都经过处理。北京日产垃圾量 1.2×10^4t，只有部分处理，这就成为污染水源、土壤和大气的重要来源。

当前侧重研究的问题有：垃圾填埋场的选址，垃圾淋滤液的控制与调查，污染水晕的阻渗墙设计，废液含水层注射以及废物综合利用等方面。国外在城市垃圾填坑设计和运转方面防治环境污染的对策，主要采取冲洗-减缓法和包容方法，即填坑顶底部有盖层和垫层。第 30 届国际地质大会交流了对地质环境污染指数因子的研究，如澳大利亚利用泻湖深部特殊沉积物（底栖有孔虫）查明了人为污染来源。日本学者利用地质污染单元的概念，将地质环境污染划分为地下空气污染、沉积介质污染和地下水污染。由于有机物污染在治理上难度较无机物更大，现研究重点已逐渐由“无机污染”转向“有机污染”，如研究地下水中非水相有机重液监控和有机物在含水层中的转化程式等问题。

城市水源污染问题也日益严重。墨西哥城、圣保罗的饮用水源面临工业废物的污染。第 30 届国际地质大会上，英、俄、南非、中国学者介绍了城市环境地质问题及评价方法，城市规划中的土地利用、评价、水资源开发、地震等方面的研究现状。会议认为目前大城市建设规划只注意了地表条件，对于深层次的地质环境问题和地质灾害问题重视不够，导致许多环境与灾害问题未能及早发现和治理。在城市地质研究中值得重视的是地质信息如何及时提取表述，以便规划和决策者使用。这方面荷兰 De Mulder E. F. Jyz 研制的“地下市政信息系统”(MUIS)，存入了有关地质、环境及市政建设数据和图形信息，使用很方便。国际地科联地学环境委员会组织了国际城市地质工作组以推动城市地质学和城市地质工作的进展。

5）不合理的土地利用和水资源开发引起的环境地质问题

人类过度垦殖、放牧、砍伐森林、灌溉不善，造成土地荒漠化或水土流失的危害达到了惊人的程度。全球每年有 600×10^4 hm² 土地变成沙漠，经济损失每年约 423 亿美元。中国荒漠化总面积已达国土总面积的 8%。到 80 年代中国每年有 2100 km² 沦为沙漠。据专家调查统计，中国北方土地沙漠化的成因类型中，有 89.7%是由于过度放牧、开垦和樵采，有 9.6%是由于水资源利用不当造成的。水土流失在欧洲各国中，以西班牙最严重，造成植被减少，农业产量降低，流入河中泥沙增多，导致洪水爆发频率及严重程度的增加。中国水土流失面积达 179 万 km²，每年流失土壤总量达 50×10^8t。黄河每年的泥沙携带量 50 年代为 16×10^8t，实际上现已达到 19.7×10^8t。这绝大部分是黄河上、中游水土流失造成的。

由于人类对地表水与地下水资源开发缺乏统一协调和综合利用，使①有限的水资源严重浪费，大水漫灌，造成大面积的土壤盐碱化。如中国西北地区因此形成的土壤盐碱化面积达 113×10^4 hm²。新疆 1/3 以上耕地不同程度地发生盐碱化，宁夏灌区也存在类似问题。②流域上游大量消耗水资源、兴建水库等，造成下游水量减少，甚至河流断流、湖泊干涸、水质恶化、沙漠化、荒漠化现象扩展、地下水补给减少、泉水枯竭。如著名的黄河下游断流已由 1995 年的 122 天延至 1997 年的 226 天。新疆的罗布泊湖现已全部干涸，成为一片荒漠。据统计，近 30 年来全疆沙漠面积扩大了 3.4 万 km²，使 333×10^4 hm² 土地和草原被沙漠所吞没。

6）超采水资源（主要是地下水）造成的环境地质问题

超采地下水引起水位大幅度下降，导致水井变干，水质恶化，地面沉降，在沿海地区

发生海水入侵等。中国长江三角洲平原及河北平原的区域性地面沉降就是由于大面积超采地下水造成的。前者在 5000 km² 内的累计沉降量约 1 m。地处三角洲腹地的苏锡常地区已沿沪宁线形成沉降洼地，地面沉降量大于 0.3 m 的面积超过 1000 km²。地面沉降发展过程与地下水开采强度有关，其沉降量与地下开采量大小呈同步变化趋势。河北平原以农业用水为主。70 年代以来大量开发利用深层地下水，现累计沉降量超过 0.1 m 的区域面积已达 3.6 万 km²。城市地面沉降影响损失更为突出。上海地区已下沉 1～2 m，天津 50 年下降了 2.7 m。地面沉降造成地裂缝、洪涝积水、工程破坏等危害。世界上不少城市，如休斯敦、威尼斯、曼谷、雅加达和加尔各答等，位于河流三角洲和滨海平原，都有严重的地面沉降。

沿海城市由于超采地下水还受到海水入侵的灾害。主要表现在淡水资源日益短缺和地下水环境逐渐恶化。如中国，位于渤海的辽东湾、渤海湾、莱州湾，黄海的胶州湾、海州湾，都受到海水入侵的灾害。其中尤以山东莱州湾最为严重，入侵面积 1995 年已发展到 970 km²。研究的内容侧重海水入侵规律、水-岩作用及其数值模拟和水资源的开发、管理等。

7）主要地质灾害问题

地质灾害灾种繁多，危害严重且突发性强的有地震、火山喷发、岩崩、滑坡、泥石流、地面塌陷、岩溶灾害，还有煤矿突水、瓦斯爆炸等。

（1）地震灾害。从地质角度当前主要侧重研究其区域活动构造（特别是大陆内部的活断层），古地震，破坏性大地震的地震地质构造以及与地震危险性评价有关的地震地质问题等热点。在第 30 届国际地质大会上探讨了 1995 年日本阪神大地震的地震构造、地面断层、活动断裂、海下和城区活动层等问题，反映了在大城市附近的强破坏性地震的最新研究动向。

地震预报近期在国际上的新进展突出表现在空间技术的应用，从方法、机理到实际震例。地震前兆观测还引进了地热观测，地气（Hg、He 等）观测等新技术方法，反映了在地球物理、深部气体地球化学等方面探索地震前兆的工作。地震预报的分析研究方法运用遗传算法、神经元方法、非线性理论等取得良好效果。俄罗斯提出多种前兆综合时空动态图像的分析方法，地下水应力场研究，以及地下水形变场的动力学研究都有较高的水平。

在地震灾害方面正在执行两个大型的国际合作计划："全球地震危险性评估计划"（GSHAP）和"全球地震灾害图计划"（WSRM）。印度、尼泊尔、巴基斯坦、中国协调合作研究喜马拉雅地区地震灾害定量分析时，建立了跨国家的地区级数据库，并规划了方法，这在以往研究中是不多见的。据陈祺福研究，关于全球地震损失估计的研究在科学上的重要突破主要表现在：发展了地震危险性评价的面源、潜在震源模型；提出了估计面源模型参数及其不确定性的新方法；得到了地震发生概率和超越概率之间关系的公式；用 GDP 作为表示社会财富的宏观指标体系；首次得到了 GDP-地震动-损失关系曲线；发展了估计未来地震灾害损失基于 GIS 的计算机算法。

（2）火山活动。第 30 届国际地质大会反映了以中国吉林长白山天池近代火山活动为例的最新研究进展，如该火山喷发的年代学，喷发的物理过程及动力学，深部岩浆囊探测及大喷发触发机制，火山喷发气候效应等。

（3）海平面上升。全球性气候变暖导致全球性海平面上升，而沿海地带首当其冲受害：低地淹没，风暴潮和海蚀加剧，咸水入侵，河口生态环境发生变化。如淤积、倒灌、污染程度加重，沿海防御工程抗灾能力降低，需要提高设计标准。经过实地考察及有关资料综

合分析预测，中国学者对中国沿海三大三角洲地区，到2050年海平面可能上升的幅度作出评估：珠江三角洲地区50～60 cm，长江三角洲地区60～80 cm，天津地区70～90 cm。沿海城市如上海、天津由于超采地下水形成的地面沉降幅度远大于海平面上升率，因此相对海平面的上升还要叠加上地壳下沉的幅度。

(4) 滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。这类地质灾害突发性强，造成损失很大。据中国统计每年发生的滑坡数以万计，泥石流沟有一万多条，多集中在中部南北带。40年研究结果表明，在时间上1954～1960年，1963～1975年，1980～1985年均为频次高发期。泰国南部的山麓地带由于花岗岩岩石风化形成1～10 m厚的砂砾质土，坡度达35°以上，1988年发生大规模滑坡及泥石流，损失达2.5亿美元。

当前在研究地区性滑坡及实例方面，对于其形成机制、稳定性分析、预测及控制措施问题，较广泛采用模型模拟及数值模拟的方法。在灾害区划方面运用了遥感及地理信息系统（GIS）。在空间预测方面有采用人工神经网络方法的。在滑坡发生时间预测方面不少研究论文采用离散元分析、离散元与时序分析相结合的方法。在滑坡发生时间预报方面有用滑坡变形功率的新理论准确（仅差22 h）预报甘肃永登黄泗滑坡的实例。黄泗滑坡总体积近$6\times10^{6}m^{3}$，居民因预先撤离，无一伤亡。这在世界滑坡预报史上是一个极为罕见的成功实例。

3.2.2 环境地质学与地质灾害学研究现状及发展趋势

从学科内容来说环境地质学应研究地质环境的自然地理地质特征及其演化历史和发展趋势，研究地质环境评价和预测，编制环境地质图系，研究地质环境（包括地质灾害）的勘查、监测和防治技术方法，以及合理利用和保护地质环境的对策和措施等。

1）地质环境评价和预测

定性地进行地质环境评价，如综合区域地质地理条件，地壳稳定性，岩土特性，地球化学背景，可能发生的地质灾害，作出分级区划评价较为易行。但是从整体上对地质环境进行系统分析，定量评价地质环境和预测在国内外仍属薄弱环节。现国际地质界开始重视这方面的研究。国际地科联CoGeoenvironment委员会于1994年建立了环境地质指标体系共27种。其内容涉及新构造活动、侵蚀与沉积、风化作用、斜坡稳定性、地下水、土壤质量、地球化学与地球物理参数、自然景观及其它动态要素，这是国际环境地学研究的一项重要进展，为开展区域性长期观测和建立预测模型奠定了基础。同时，委员会还计划开展"地表过程与土地持续利用"关系的研究。

国际上区域环境地质评价的方法有A. Cendrero等提出的自然单元分级体系为基础，基本上是自然地质地理分区，加上半定量化的指标，该方法在西班牙被广泛应用；有经济评估与风险评估方法，以地质灾害和地质问题作为评价主体，用货币值形式表征地质环境质量的优劣及人类活动对其产生的影响。这在美国有较广泛的应用。如加利福尼亚州城市地质总体规划，旧金山湾地区土地潜力定量评价，美国九大自然灾害的风险评价。中国学者采用系统论观点，提出地质环境是一个内部由岩石、土、水三个子环境系统构成，外部处于大气圈、水圈、生物圈、地球内部圈层及人类社会经济系统作用下的开放、动态和人-自然复合系统，以环境地质问题的强度指数，外部系统的影响程度指数和地质环境的质量指数作为量化指标建立了地质环境系统及其评价预测体系，并作出了21世纪初期中国地质环境态势的预测和评价。

2）环境地质制图

环境地质图（系）是环境地质研究成果的图式化，是直观反映地质环境的重要表达形式。为了便于经济建设规划决策部门使用，不仅要求内容科学化，充分反映区域地质环境特征，分析研究不同地区地质环境与人类活动的相互关系，在自然和人为作用下存在的主要环境地质问题及地质灾害，并进行综合评价，而且要求形式简明易读。国内外编制了不同比例尺的综合性或专门性图件，既有全国性的，如俄、美、加、澳、英等国均将其列入国家级中、大比例尺地质图的构成部分，也有一个城市或一个地区的编图。从编图方法看，在传统的地质学编图方法基础上，借助GIS及最新卫星成果，根据不同指标参数用多元统计方法编制数据库，对地质灾害进行预测，意大利、巴西、美国均取得较好的效果。俄罗斯已将1：200万地质生态图（即环境地质图）列为国家新一代地质图系进行填编，并对1：5万地质制图的要求也从以前的两种（地质图、矿产预测图）增加到与1：20万相同的四种[1]，包括了地质生态图在内。现已编制完成14张1：500万生态地质图，反映了全俄生态地质环境现状及人类活动的影响。

中国水勘院1992年编制出版了中国环境地质图系11幅。它们以地质灾害图件为主，其中8幅为滑坡崩塌类型及分布，泥石流灾害，岩溶塌陷，地下水诱发危害，土地盐渍化沼泽化，沙漠及土地沙漠化，土壤侵蚀，特殊类土及危害。另外3幅则为地质自然保护区、旅游地质资源和环境地质分区图。该图系综合评价了不同地区的环境地质条件，反映了主要地质灾害类型形成和分布发育规律，提出合理保护地质环境、开发地质资源的对策建议。

3）环境地球化学

这是环境地学的重要分支学科。其主要研究内容包括微量元素与健康、地方病的关系，煤和有机物等的地球化学对环境的影响，全球环境变化以及分析技术等。通过地球化学填图可获得元素丰度的背景值，为防治地方病提供科学依据。如中国已查明低硒（低钼）的地球化学环境带，它呈NE-SW向，与克山病分布区域基本一致，从而采取相应防治措施，取得显著成效。众多的地学研究者开展了地质环境中氡、锶、氟、汞等元素与流行病、地方病、癌症发病率的关系研究。氡含量与肺癌死亡率的关系在云南个旧地区得到了验证。矿区的氡含量超出一般地区的23倍，死亡人数达千人以上。大部分氡来自花岗岩中铀的衰变。中国通过编制元素环境化学图、浅层地下水地球化学图、地方性氟分布图、胃癌死亡率分布图和大量资料的分析，有力地说明了地质环境和流行病学的关系。近年来，研究利用自然地球化学作用去除有关化学元素，调整环境条件；还有新兴的植物治理法，利用植物（萃取技术、根际过滤技术、重物固化技术）来清洁土壤中的重金属。因此，环境地球化学的成果在当前环境治理的理论与实践中起着极为重要的作用。

4）地质灾害学

由于地质灾害分布广泛，类型众多，其突发性、复杂性及发生规律尚未充分掌握，往往造成严重灾情，引起社会的关注和众多学科，特别是地质科学的参与和研究，因而逐渐形成并提出了地质灾害学的概念，研究内容包括地质灾害的类型划分，成灾条件，致灾作用，地质灾害的监测、预测和预报，地质灾害的防治原则和对策、决策以及风险分析。其中对地质灾害的决策可分为长期、中期、短期的，临灾的和反馈性的。灾害预报的基本方

[1] 顾承启译．1996．原苏联地质部地质生态调查和制图的要求．地质矿产部地调局，中国地质矿产信息研究院．

法建立在类比分析、因果分析及统计分析基础之上。

近10年来国内外开展了重点地区的地质灾害测年研究工作。他们应用同位素测年技术：^{14}C法，铀系法，热发光(TC)法，电子自旋共振(ESR)法测定10～3 Ma的年轻地质体、活动断裂、古地震、地质体滑动或运动的年龄以及地质灾害复活(发)周期等取得成效。

如何加强地质灾害预测和防治的理论研究，实现灾害地质现象的实时控制和管理决策过程科学化与人工智能化，是一项新的研究内容。中国专家1989年就研制了“地质灾害分类专家系统”。在此基础上又研制了“地质灾害预测防治智能决策系统”。应用这个决策系统可进行地质灾害时空演化预测，危险性区划，灾害经济评估以及减灾防灾对策的选择等工作。在应用于京、津、唐地区岩溶塌陷、地面沉降、海水入侵地质灾害时，证实了模拟的合理性和实用性。

在全国性地质灾害趋势预测方面中国作了重要的探索。1996年编制了1：600万地质灾害趋势预测图。该图运用地理信息系统的风险评价方法对地质灾害（主要是滑坡、泥石流、岩溶塌陷、地裂缝）进行现状评价；在此基础上，结合降雨条件，区域地震活动，区域地壳稳定程度，区域岩组条件和人类工程活动等因素，运用模糊综合评判模型进行综合评判，划分出地震灾害高、中、低风险区，这对国土整治和减灾防灾有重要意义。

对于地质灾害的评估也是地质灾害学的重要研究内容之一。“八五”期间中国研究建立了灾情评估计算机系统[1]。该系统根据地质灾害勘查与管理需要，将灾情评估分成3种类型：以独立灾害体为对象的点评估，以小面积行政自然区为对象的面评估和以大面积行政自然区为对象的区域性评估。根据灾情构成，将地质灾害评估内容和步骤分为4个方面：危险性评价，易损性评价，破坏损失评价，防治工程评价。应用该系统针对崩塌、滑坡、泥石流、岩溶塌陷、地面沉降、地裂缝、海水入侵、膨胀土胀缩等8种地质灾害进行了研究，为决策部门确定灾害防治对策和管理提供了依据和方法。国际上自1990年开始制定了“国际减轻自然灾害10年”（IDNDR）计划，其中对于灾害定量化的研究是减灾科学中重要的问题。

地质灾害经济评价方面的进展[2]：在开展地质灾害的勘查、监测和防治时，都涉及到经济活动或经济现象，需要作出合理的经济评价。但国内外目前尚缺乏可供借鉴的系统理论、方法和经验。目前在灾害经济评价中采用了价值评价法，还有效益评价法、机会成本法等，为制定和选择防治灾害最优决策方案提供可靠的经济依据。“八五”期间中国学者提出了地质灾害经济评价系统。它包括灾害风险评估（单项和综合地质灾害风险预测及评估，以及危险区预测和评估）和灾害经济评价（防灾方案技术经济评价，含防灾效益评价以及灾害损失经济评价）两部分，其中一系列技术方法的应用具有实用意义。

5）地质环境与地质灾害的勘查、监测和防治

对在人类工程经济活动影响下的地质环境和灾害进行勘查，并对其变化动态进行长期有效的监测，是研究保护地质环境和防治地质灾害的重要依据。不少国家开展对主要地质灾害勘查、监测和防治方法技术的研究，取得重要进展。中国已在各省、市建立了地质环

---

[1] 张梁，张业成，张杰坤等．1997．地质灾害灾情评估．见：软科学研究成果简介（选编）．地矿部“八五”科技成果交流材料．

[2] 向耦熙，张梁，张业成等．1997．地质灾害经济评价系统．见：软科学研究成果简介（选编）．地矿部“八五”科技成果交流材料．

境监测站网，在勘查技术新方法方面有遥感、高分辨率地震、高密度电法、土壤测氡等，并研制了^{218}Po测氡仪和微机音频大地电场仪等两种新型勘查仪器。这种新的勘查技术方法和仪器对调查地面岩溶塌陷、地裂缝、活动断裂、隐伏溶洞、潜在的地质灾害有明显效果。

实践证明，遥感技术和GIS应用于地质环境和地质灾害的监测、管理有广阔前途。加拿大用最新发射的Radarsat最新数据研究环境地质问题。美国学者用雷达研究地壳形变、火山监测、新构造运动取得好的效果，中国学者用大量影像资料展示出煤层自燃火区地质灾害的情况。在第30届国际地质大会上，美、日学者报告了红外遥感技术，德国介绍了用高空间分辨率星载传感器在地质中应用的成果，荷兰将遥感用于灾害预防、防灾准备及减轻灾害3个方面的成果，这些都代表了当前国际上的研究水平。在地质灾害监测新仪器方面中国最近研制了地声监测器，滑坡诱发因素监测仪器，遥控边坡稳定性监测仪器和滑坡自动报警仪器4种类型[❶]，为采用多参数、多因素监测灾害发生提供了手段。地声监测对崩塌、滑坡孕育初期十分有效；滑坡诱发因素主要监测滑坡体内土壤含水率，孔隙水压力及土体温度；遥控全自动边坡稳定性系统可同时监测72个点上的滑坡地表位移或孔内位移；滑坡自动监测报警系统则监测滑坡位移参数，有16个通道，位移超过门限值时即发出声、光报警信号，其中一些仪器达到国际先进水平。

地质灾害治理新工艺新设备方面，研制成功MD-50型锚杆钻机，具有多用性，有钻进复杂岩层和处理事故的能力，可用来治理滑坡。此外还有扩底承压式预应力锚索，这是加固崩塌、滑坡体的重要治理工具。

3.2.3 当前环境地质科学发展特点和趋势

1992年的联合国大会通过的“环境与发展宣言”和“21世纪议程”表明，人类已逐渐认识到经济发展必须与环境相协调，开始建立了持续发展战略的观念。在各国的议事日程上，已出现了环境地质与经济地质并重的趋势，甚至超越后者。以发达国家美国为例，美地调所地质处制定的2000～2010年科学战略有7个科学目标：①为减灾规划进行地质灾害评价；②提供地质灾害短期预测并快速查明灾害后果的特性；③进一步提高从全球地质、经济和环境的角度对国家能源和矿产资源的认识；④预测气候易变性对环境的影响；⑤建立生态系统结构和功能的地质框架；⑥解释人类健康与地质作用过程之间的关系；⑦确定地下水资源与有害废物隔离的地质控制条件。它们几乎全部与环境地质有关。

综观上述可知，当前环境地学的发展特点和趋势有以下几方面：

(1) 环境地学发展趋势之一是多学科的交叉和结合，其综合性、预测性和社会性将进一步加强

综合性体现在对众多的环境地质问题和地质灾害的调查研究，以及协调人类活动和地质环境的关系时，不仅需要地质科学的一些分支学科，如工程地质、水文地质、构造地质等的参与，而且还需要其它科学如社会科学、系统管理科学等和高新技术的参与。只有通过多学科的综合交叉结合，才可能解决复杂的环境地质问题。

地质环境的变化趋势以及在人为作用下的改变，地质灾害的发生既有缓变性，又有突发性和不确定性，因此加强预测和预报是环境地学的研究重点之一。同时，为了减轻灾害的影响和损失，避免产生不良的环境地质问题或控制其发展，还必须把人类活动这一地质

---

❶ 地质矿产部水文地质工程地质研究所．1995．主要地质灾害勘查、监测及防治技术方法研究．

作用限制在可允许的范围内，这就需要公众、全民的环境意识和行动配合，甚至政府、社会的行政管理和决策干预，统一制定有关的政策和法规，才能达到合理利用和保护地质环境的目的和效果。只有在实践中注意结合这“三性”特点，环境地学才能有较大的发展。

（2）对区域性或重要经济开发区、工程建设区的环境地质研究将进一步加强

发展中国家的环境地质研究和工作，一般都结合国土资源开发、重大工程建设项目来进行。不同的地质环境会产生不同的环境地质问题。如果在规划设计阶段即开展环境地质研究，并协调人类活动与环境的关系，将可收到事半功倍的效益。纵观正在兴建的三峡水利枢纽工程将大大改变周围甚至全流域的生态地质环境，如水土流失、边坡稳定、下游水文动态等。晋陕内蒙古能源基地的开发与地质环境的保护也存在很突出的问题，水质污染，水土流失，土地退化等。埃及在尼罗河上兴建的阿斯旺大坝所引发的生态地质环境变化（三角洲后退，中、上游土地盐碱化、河岸侵蚀等）至今还在继续。

为加强区域性环境地质调查评价开展了新的地质填图工作。美国《全国地质图填图方案》填图的服务目标是：矿产、能源和水资源勘查与开发；有毒废物及核废料处理场地的调查和选址；土地利用评价与环境保护规划；地质灾害减轻；火山喷发灾害预测；地基基础工程设计与建设；减轻滑坡及其它地面破坏损失；降低海岸和水系侵蚀影响强度；重要工程选址；以及基础地学研究工作。中国新一轮大比例尺地质填图也加强了区域性环境地质调查内容。

有些环境地质问题所涉及的区域还可跨越国界，如欧洲的莱茵河为五国所共有。在一个国家出现污染就会影响邻国，这就需要这些国家共同来保护。因此，国际合作研究地质环境的趋势也在增强。

（3）城市环境地质研究将成为研究重点

城镇化进程加快是当今世界社会发展的趋势。据联合国预测，到2000年人口为500万以上的城市将达60个。世界上将有60亿人口的一半集中在城市。增长最快的是发展中国家。我国城市规模发展相当快。

年　份	城　市　数	100万人口以上城市数
1970	213	11
1990	461	31
1996	622	32

城市建设发展日益扩大，地质环境与人类工程-经济活动的矛盾进一步加剧，城市环境地质问题也日益突出。有人提出城市地质学，或城市环境地质学，其任务就是如何合理利用和保护城市地质环境，为城市发展规划、布局服务，预测和防治环境地质问题的产生和对地质灾害采取防治措施。许多发达国家如加、英、澳、美以及亚太地区、欧洲都纷纷针对城市环境地质问题开展研究。诸如土地利用、地面沉降、地裂缝、地震、滑坡、塌陷、固体废弃物，特别是有害有毒废物、废水对地质环境的污染等，都是解决难度较大的问题，需要加强研究。

（4）对地质灾害的预测预报和地质环境工程的研究将进一步加强

对地质灾害的预测预报和评价已逐渐由定性向定量方向发展，建立了一些预测模型，这

主要依靠引进数理分析方法，计算机技术、遥感技术、人工智能等。为了进一步满足环境规划、设计决策和减少灾害损失的需要，加强地质灾害预测的理论，尤其是时间的预测技术和方法，以及地质灾害的动力学机制和过程研究是重要的发展趋势之一。正确预报的基础来自可靠的动态观测和监测数据。因此有关的监测仪器、技术需大力发展。现国内外都开始采用GPS（全球定位系统），RS（遥感），GIS（地理信息系统）相结合的新技术以及地球物理、地球化学勘查、遥感技术、计算机技术进行灾害的适时监测、评估和预警业务系统，取得成效，值得大力发展。同时还应重视基础性的工作，建立地质灾害数据库和风险填图。国际减灾计划研究围绕监测、预报、防护、治理为主展开。因此地质灾害预警系统、区域地质灾害区划、风险评价和环境地质质量综合评价等多种技术、方法相结合是重要的发展趋势。

为防治和减轻地质灾害，地质环境工程研究的加强势在必行。以往地质学家对这一领域涉足较少，主要侧重对环境地质问题的调查和成因、机理等研究。对如何治理只是一些方向性的建议，具体的治理方案及实施则是工程部门的工作，实际上从防治工程的方案设计制定、勘查、施工以致建成以后的环境效益、反馈监测都离不开环境地学的指导和分析。因此必须加强地质环境工程研究这一薄弱环节。

地质环境工程也称环境地质工程，这是因为它是以环境地学知识为基础，使用综合手段，防治地质灾害和其它不良的环境地质问题的工程技术体系。它的内容广泛，如荒漠化的防治工程，地质灾害的防灾减灾工程，复杂地基的处理，地表水地下水联合优化调度工程，污水净化处理工程，海水入侵防治工程，固体废弃物地质处置工程，地下水环境工程等。地质环境工程研究需要多学科的综合交叉以及新技术、新方法、新材料的引进。

这方面研究中国正在起步，但已收到成效。长江三峡链子崖危岩体，其底部是煤层采空区，对三峡库区造成潜在威胁，急需加固。1992年开始研究并实施防治工程，包括采空区的阻滑工程，上部危岩体的锚固工程，扩建危岩体自动监测系统，坡面修建排水系统以及防冲消能平台等。现工程已于1997年完工。其治理技术水平在世界上也是罕见的。在山东莱州湾修建了防治海水入侵工程（拦蓄地表水、地下水工程，阻水帷幕，橡胶坝等）。科研部门密切配合，不断监测研究、指导和检验工程的防治效益。

（5）重视生态环境地质研究

这是研究以人类为主体的生物与地质环境间相关的科学。把地质环境作为生态系统的组成部分，也是对人类生存环境进行研究的科学。

地质环境中某种元素缺乏或富含从而影响人体健康，甚至导致中毒或地方病的发生。如碘、砷、硒、钼、汞、氟等的分布规律，地球化学特性，危及人体的方式和途径，如何改善环境质量，都有待环境地质科学与其它学科来协同研究。

近年来发现生态地质环境的地球化学背景与农作物的优质高产有密切的关系。不同的地质地球化学环境宜种的作物不一样，因此农业生态地质研究已成为一项有广阔前景的环境地学研究课题。

3.2.4 我国环境地质及地质灾害研究应注意的问题

我国为发展中国家，理所当然加速经济建设的发展，增强国力是我们的奋斗目标。但与多数发达国家建设初期一样，陷入先污染、后治理的误区，走牺牲环境生态效益以获取近期的经济效益的弯路。越来越严重的环境污染和生态破坏所产生的负面影响，使人们开

始重视环境保护必须和经济建设并重，并把环境保护作为基本国策。国家已提出了跨世纪的环保目标：2000 年要力争使环境污染和生态破坏加剧的趋势得到基本控制，部分城市和地区的环境质量有所改善；到 2010 年，要基本改变生态环境恶化的状况，城市环境质量普遍有比较明显的改善。“中国 21 世纪议程”已制定了中国 21 世纪人口、经济、社会、环境和资源相互协调可持续发展的战略计划和政策，其中对能源、自然资源利用和保护、荒漠化防治、防灾减灾、大气层保护、固体废物无害化管理等都提出了具体的目标和要求。如 2000 年前，土地荒漠化治理面积由 10%提高到 30%，蔓延速度减少到每年 1000 km^2 等。总之这是一项十分艰巨的系统工程。要想实现这个目标，应重视注意以下几个问题：

（1）增强全民的环保意识和开展地质灾害防治科普宣传教育。尤其是规划、建设、开发部门和企业，必须注意资源开发、建设与环境的协调，即人地和谐，以促进我国经济与社会的可持续发展。对国土资源的保护和管理的原则是：在保护中开发，在开发中保护。

（2）加强相应的法规建设和政策的制定。依法治国是根本。政府从宏观上用政策加以引导，强化企业环境管理。现虽有环境保护法、大气污染防治法、固体废物污染环境防治法、水法、矿产资源法、土地管理法等，但还有待进一步完善和存在执法不严的问题。至于针对其它存在问题需立法的还不少。如地质灾害防治法、自然资源保护法等。

（3）积极开展对重点经济开发区，大江、大河、大湖流域，沿海经济区（海岸带）以及城市建设的环境地质和地质灾害的调查评价和治理。1998 年的长江特大洪水灾害把重视流域生态地质环境保护的问题提上了日程。黄河、淮河以及洞庭湖等隐伏的地质灾害及环保形势十分严峻。目前正在长江三峡、黄河小浪底修建大坝，预测其下游地区地质环境的演变，包括水环境、水动力、沉积作用、库岸稳定性、入海口三角洲的变迁等，都是重大的环境地质问题。

全球十大污染严重城市我国就占了一半：北京、上海、广州、西安、沈阳（据 1987～1990 年空气悬浮物及 SO_2）。我国城市垃圾产生量每年约为 1×10^8 t，有 200 多个城市陷入垃圾包围之中。抓住这些重点地区、地带和城市，制定环境治理规划和针对性的治理措施，有望改善我国环境质量的险恶形势。

（4）开展环境地质基础研究，依靠科技进步发展环境地质产业。广泛采用现代高新技术，提高地质环境及地质灾害的监测水平。地质灾害的预报、预警系统，还有环境地质工程，从设计、技术到施工都要加强研究。

3.3 水文地质

水文地质主要是一门研究地下水的起源、形成、分布、勘探、开发利用及有关环境等问题的学科，是地质学的一门分支学科。人类生存和社会发展都离不开水，淡水资源历来是国民经济和社会发展的重要制约因素。据世界气象组织和联合国教科文组织 1991 年报告，全球水消耗量由 20 世纪初的 $5000\times10^8 m^3/a$，到本世纪末将增加到 $50000\times10^8 m^3/a$，即增长约 10 倍。

全球的水资源分布极不平衡。约 65%的水资源集中在不到 10 个国家里，而人口占世界总人口 40%的 80 个国家却严重缺水。这些最缺水国家大多分布在非洲、中东和近东。除了地区分布不平衡外，人口的增加、城市化进程以及使用方式也加剧了水资源的紧张形势。在

每年消耗的淡水资源中，灌溉用水占 70%，工业用水占 24%，其它为家庭用水等。

水资源匮乏的威胁日益严峻，对地下水的开发需求也随着提高。资料表明，全球在 80 年代中、后期地下水开采量为每年 $5500\times10^8m^3$，其中开采量每年大于 $100\times10^8m^3$ 的美国、印度、中国、巴基斯坦、欧共体、独联体、伊朗、墨西哥、日本、土耳其 10 个国家和地区的开采量之和占全球总开采量的 85%，地下水开采量每年在 $10\times10^8\sim100\times10^8m^3$ 的近 30 个国家，其总开采量占全球总开采量约 10%，如韩国、澳大利亚、沙特阿拉伯、埃及、阿尔及利亚、秘鲁等国。其余国家地下水年开采量小于 $10\times10^8m^3$，其开采量之和占全球总开采量约 5%。可见地下水的开发也是很不平衡的。

随着地下水开发利用实践的深入，人们对地下水的认识和观念有了很大的转变，开始认识到地下水不是取之不尽、用之不竭的，因而把地下水作为一种宝贵的地下资源来对待，从而使对地下水的研究提高到影响社会可持续发展、人类生存和环境保护的战略高度，水文地质学科获得比以前更强的应用意义。因此，从基础研究和应用研究两方面来分析水文地质学的一些热点和前沿问题的发展现状和动向。

3.3.1 地下水资源评价和管理的研究进展现状

为满足社会、经济持续发展的需要，必须对有限的地下水资源实行科学的管理；而科学管理则建立在对地下水资源正确的评价基础之上。

1）地下水资源的评价

地下水资源量通常分为天然资源和开采资源两部分。几十年来随着评价方法不断的改进，许多国家都多次对区域地下水资源重新进行评价，提高其精度。如原苏联在 1977 年发布的地下水天然资源为 $7044\times10^8m^3/a$，开采资源约为 $3185\times10^8m^3/a$。中国在 80 年代进行了全国地下水资源的评价工作。汇总结果：天然资源约为 $8700\times10^8m^3/a$，开采资源约为 $2900\times10^8m^3/a$。90 年代对各重点国土规划片和大的自然单元的地下水资源进行了更详细的计算和评价。美国从 1978～1994 年专门立项研究大面积分布的层状含水层系统的地下水资源，共圈定 328 个区域含水层系统。这项“区域含水层系统分析计划”（RASAP）采用分布参数系统的有限差分法评价地下水资源。欧共体 9 个成员国，包括英、法、联邦德国、爱尔兰、丹麦、荷、比、卢、意于 80 年代联合对区域地下水开采资源进行了评价，编制了 38 幅 1∶50 万的图幅，地下水超采区占丹麦国土的 16%，占英国国土的 4%。由此可见，在区域地下水资源的定量评价方面已取得重要的可供应用的研究成果。

2）地下水资源的管理

地下水资源的管理不仅是一个技术性问题，而且还是一个社会性的问题。因为提出一个地区或一个城市的最佳或最优化地下水开发方案和管理模型，是专业人员可以做到的，而能否实施在很大程度上取决于地方行政管理部门的重视程度、管理体制和相应的政策法律保证。所以地下水资源的管理是一个统筹兼顾的系统性工程。不仅要解决当地的水资源问题，也要解决整个流域的水均衡问题；既要预测地下水动态的变化对环境自然条件的影响，也要从经济社会发展角度评价规划水资源的开发和管理。在管理目标上不是单纯考虑含水层特性，而是多目标的，即社会、经济等多种因素。为改善水资源的管理状况[1]，国际上一

---

[1] 张丽君．1998．国外地下水勘查评价和开发管理的现状与未来．见：中国地质矿产信息研究院编．跨世纪的地学态势——调查与科技．

些国家开始重视研究地下水的经济价值，以提高其使用和分配的合理性；研究用水市场和水的转让，以提高其经济使用效益，如美国、智利、墨西哥都在积极推行水资源管理新的运行机制。

50年代后期国外开始用模型的方法管理水资源，中国则始于80年代后期。水资源管理模型研究经历了模型理论摸索、发展、推广应用和实用性研究4个发展阶段。90年代主要研究如何利用水资源，在保证最大经济效益的同时，保持良好的生态环境和社会环境。模型的目标函数除了普遍考虑经济目标外，水质、环境和社会目标也在考虑之中，并且随机性的水质管理模型明显增多。在已建模型中地下水管理模型居多。

由上可见，地下水管理从单一的水力学管理模型发展到综合考虑社会、经济和环境的地下水主要管理模型，从单一的地下水管理发展到地表水、地下水联合管理，从地下水水量合理开发到综合考虑水质、水量管理一体化模型，从集中参数管理到分布参数管理。今后地下水管理明显的发展趋势是（贺学海，1997）：①以水资源的可持续发展为中心，即对水资源的开发利用必须与人口、经济、资源、环境协调发展；②大系统、多目标、多级优化的综合管理趋势，水资源系统是一个高度复杂的非线性系统，其功能和作用是多方面、多层次所决定的；③随机、动态、智能化的趋势，从以前的趋势性、确定性评价方法转向随机性和模糊性的评价方法，发展非线性的解法并建立智能化的模型。

对于如何解决淡水资源，尤其是地下淡水资源的科学管理和利用，1992年“水与环境：21世纪的发展问题”的国际会议，总结了世界各地淡水资源合理利用和管理中正反两个方面的经验，呼吁建立评价、开发和管理淡水资源的新途径：①强调岩石圈-水圈-生物圈-大气圈之间的相互作用；②建立资源节约型发展战略；③检验淡水资源管理的有效程度取决于社会和经济的可持续发展和生态环境的保护与改善；④决策管理部门、广大用户、科研工程技术人员、单位等共同参与管理；⑤强调基础建设、能力建设及其相应的研究。会议提出加强淡水资源的管理研究应从基础研究和实际应用两方面着手。而“研究岩石圈-水圈-生物圈-大气圈之间的相互作用，研究水文循环以及生物地球化学循环之间的相互作用，包括质和量两个方面，在全球、地区和局部地方等不同空间尺度范围内进行并互相比较”[1]，被认为是淡水资源管理研究的重大基础研究方向，可以从根本上帮助弄清淡水资源的形成、演变以及在人类活动影响下的变化。

3.3.2 地下水资源的污染、治理和保护的研究现状

现在全世界都在关注水资源的危机。1994年在芬兰召开的“地下水资源未来危机”国际学术讨论会主要围绕水质污染及超量开采两大问题。会议认为只要对水资源正确评价，合理规划，严密监测，科学管理，超量开采的问题是可以避免的。而日益严重的水质污染和恶化却成为威胁水资源持久开发的主要危机。国际水文计划（IHP-5）已把“脆弱环境下的水文学与水资源开发”列为1996～2001年的主要研究课题，其中最重要的一个专题，即“地下水资源的未来危机”的内容则包括：地下水污染的研究范畴，探测地下水质的监测策略，包气带地下水供水水质化学作用规律，滨海地区地下水水质恶化，以及城市发展与水质污染等。由此可见，地下水的质量问题是当前水文地质研究的重要内容。

[1] IHP Secretariat. 1992. Hydrology and water resources development in a vulnerable environment. IHP/IC/X18, Paris.

长期以来，人们对地下水资源重开发利用，轻保护。而地下水资源在受到人类活动，如农业生产、垃圾填埋、废水排污等影响时极易被污染。地下水一旦受到污染，其补救和恢复是非常困难的，而且治理费用代价昂贵。因此如何保护地下水不受污染受到各国的重视。

美国于 1991 年开展了全国水质评价计划。英国、澳大利亚近年来也对地下水水质进行评价研究，对人类活动包括农业活动、工业活动、废物处置、填埋等造成对地下水水质的影响，地质过程与生物相互作用等问题设立了专题研究❶。

1）地下水的污染和治理

对于已造成地下水污染的地区，国内外许多学者致力于研究污染的物质来源、污染的途径和范围、污染机理等问题，并取得大量研究成果。这些成果为查明地下水污染情况和治理提供了科学依据和方向。

80 年代以来，地下水污染研究的重点已从无机物（重金属）的污染转向微量有机物的种类、物化特征及其在环境中的迁移转化，以及污染控制治理技术等。这与整个环境污染的发展进程是一致的。西方国家在治理环境污染的进程中，大致经历了重金属污染、易降解有机物与富营养化污染以及毒害性有机污染 3 个阶段。目前能基本控制第一、二阶段的污染，开始重视毒害性有机污染的治理。中国无论在有机物污染的理论还是治理技术方面的研究却刚刚开始。有机化合物种类多、数量大，绝大多数难溶于水，在水中含量很低，仅为 10^{-6}～10^{-9}级或更低，降解慢，中间产物复杂。它们进入包气带和含水层后，不仅其残留物可维持数十乃至上百年，而且其降解后的中间产物亦对环境有污染。有机污染物通常分为 2 类：第一类是量大易降解（包括生物降解和化学降解）的有机物；另一类是有毒有害难降解有机化合物。农业活动造成的地下水污染后果也很严重。由于硝酸盐中氮在作物-土壤-水系统中的运动，进入含水层的氮就可能增加。捷克在过去的 30 年内，地下水中氮含量增加了一倍。现地下水中已发现各种烃类、卤化物、醇、酚、醚、醛、酮等各类有机化合物。据报导，至 1987 年美国地下水中已发现 175 种不同的有机物，其中很大部分对人体有毒性效应。荷兰在 232 个地下水抽水点中检出 113 种有机物。中国京津唐地区地下水初步调查检出有机物种类达 133 种，可见地下水有机污染已到了非常严重的地步。

地下水中危害最大而又最为常见的有机污染物为非极性难溶挥发性有机物（VOC's），主要由氯代脂肪烃（CHC）和单环芳香烃（BTEX）构成。现已查明，多数水溶相 VOC's 在地质环境中不易被吸附，具有很强的迁移性，在适当条件下可生物降解。非水溶相 VOC's 对微生物有毒性，不易生物降解。非水溶相 CHC 常在地下水中积聚，其迁移不受地下水运动的控制，因此常汇集在含水层底板；非水溶相 BTEX 则相反，飘浮于地下水的表面。

第 30 届国际地质大会就有不少论文涉及地下水污染监测、参数测试；对 Pb、Cu、Zn 等污染物的实验室研究；污染物运移趋势预测；地质统计方法与随机理论在地下水污染研究中的应用；某些污染物（如氮污染）的研究实例以及一些模拟理论，例如以保护含水层为目的的河流-含水层相互关系模拟；非均质含水层与裂隙岩溶水污染研究；土地利用过程中的水土污染；污水灌溉的环境生态效应等等。其中美国 Yun-Sheng Yu 运用地质统计法进行地下水中盐污染的研究，大大提高了计算精度，是一个成功的实例。

---

❶ 刘树臣．1998．国外环境地质工作的主要进展与启示．见：中国地质矿产信息研究院编．跨世纪的地学态势——调查与科技．

最近美国报道了关于在地下水生态领域里应用无脊椎动物群结构的变化作为浅层地下水/地表水环境污染的指示剂；以及用CFCs确定年轻地下水年龄（50年以内或更小）和用氚/氦-3研究地下水运移时间、水流类型和补给速度，为测试和校核模型提供了有力的工具。此外，在发展生物治理技术方面，通过微生物降解作用、吸收、转化有毒化合物，消除污染，取得显著成效。

地下水的污染治理美国在80年代就先于其它国家开始着手进行。当时以“抽汲处理法”较为普遍，即抽出已被污染的地下水，在地表进行深度处理，但含水层不能彻底净化，且处理费用高。对于大规模的污染治理还没有成功的经验。80年代后期地下生物处理工程技术迅速发展，地下水污染控制理论与技术开始形成一套体系。如“对于包气带污染，可进行原位处理或开挖处理。原位处理包括物理法（通气法、蒸汽法、热趋法……）、化学法（表面活性剂溶液冲洗、特殊化学冲洗）和生物法（驯化生物处理、强化生物处理）；对含水层污染可进行原位处理或抽汲处理，前者又包括物理控制（泥墙、防渗帷幕控制法、水动力控制法、暗渠、井孔收集法），化学处理（表面活性剂溶液冲洗法、试剂法、渗床法）和生物处理。采用何种处理工艺，主要取决于处理的对象、目标、水文地质条件和经济承受能力。”在各种方法中，现场处理技术包括多种形式的好氧处理和厌氧处理，发展较快。

为了进一步发展地下水污染控制理论和技术方法，急需加强引进多种学科如地质微生物学、有机地球化学、表生地球化学的理论和方法，加强对有机污染物的来源、迁移、转化或降解机制，以及它们与腐殖酸、金属元素的相互作用的了解，加强土壤和地下水污染治理的新技术开发利用研究，突破解决目前缺乏能快速准确鉴别有机物种类和定量分析的仪器设备的局面，发展治理工程技术方法。

2）地下水资源的保护

为了防患于未然，首先要防止地下水供水水源地受到污染。一方面是保护水源补给区不受污染，另一方面是设立圈定地下水供水水源地的保护区（带），以加强对潜在污染的限制。这里涉及的主要是点源、井源区保护。而非点源整个水流域的水质监测、保护和污染治理技术要困难得多。

圈定地下水源保护区（带）的研究，由最初为确保饮用水卫生条件防止细菌污染的概念已扩大到防止非降解性有机物以及有毒化学成分的污染为目的，在欧美一些国家取得进展。德国对地下水源保护区的圈定是先将流域分为4个保护带，重点探讨第Ⅱ带随时间变化边界的概念，它采用地下水在50天内运行的距离范围。英国根据50天（一区）和400天（二区）运移时间以及整个汇水盆地（三区）确定出地下水保护区。其它如美、捷、爱尔兰、荷等国研究的主要特点是逐步向应用数学模型的方向发展，以提高成果的精度。德国提出可利用环境同位素^{3}H、^{14}C建立动态模型，用地下水环境同位素的滞留时间作为新的水文地质参数以反映地下水特征，并作出定量污染程度分析。中国也有人用时间滞留法来定量研究确定地下水源地保护区。

不少国家已认识到，地下水资源的保护必须提到战略、政策及管理的高度来认识和实施。捷克专家提出，地下水保护战略是政府部门进行管理、协调、投资和贯彻执行的长期任务，要得到有关法律法规的支持，正规的监督检查，甚至包括对技术负责人员的培训以及对公众教育和提供信息。地下水保护政策的制定取决于地下水资源的价值需求、土地利用规划及经济发展和人体健康等因素。地下水保护的管理目标应是确保饮用水水源的质量、

安全和可持续性。

地下水保护管理可分为一般性保护和公共供水方面的综合性保护。前者需要编制地下水脆弱性图件并进行评价。评价地下水脆弱性的主要特征为非饱和带的补给、土壤性质、厚度、渗透性和稀释能力以及饱和含水层的稀释能力。受到综合性保护的地下水保护区的范围主要取决于含水层的渗透性、复杂性和脆弱性、非饱和带的特性及厚度、地下水水流方向、污染源离水井或井田的距离及污染质的特性。英国开展了对地下水资源的脆弱性的全面评价，认为其脆弱性受多种因素制约，如上覆土壤和冲积层的存在和性质，水文地质单元的特性以及非饱和带的厚度，因此需要详细的水文地质现场调查。英国现已编制了1：100万地下水脆弱性图件作为战略性土地利用规划的指导，目前正编制大比例尺图件。美国、意大利、荷兰、德国、瑞典、捷克也都编制了大比例尺的地下水脆弱性图为决策、管理层制定地下水保护的战略和方针服务。90年代美国开始倡导使用水流域的综合保护方法，共同解决水污染和生态环境恶化问题，可收到事半功倍的效果，更好地实现环境综合管理目标。

3.3.3 干旱、半干旱地区地下水

干旱、半干旱地区地下水研究一直是水文地质界关注的现实问题，因为全球约1/3的陆地面积被划归为干旱地区（据联合国教科文组织1977、1979年资料）。通常认为年降雨量在0～50 mm为极度干旱区，50～200 mm为干旱区，200～500 mm为半干旱区。世界上近一半的国家都不同程度地受干旱的影响，如中东、北非、南非、纳米比亚、澳大利亚中西部、南美的秘鲁、阿根廷、欧洲的西班牙、美国西南部和墨西哥北部、原苏联中亚等国、伊朗、巴基斯坦、蒙古以及中国的西北、华北地区干旱都比较严重。

由于干旱区的地表水源有限，水质又差，且时空分布极不均衡，因此，分布较广，不易因蒸发受损失，水量、水质相对稳定的地下水，就成为干旱、半干旱地区的重要供水水源，甚至有时起到不可替代的作用。但深层地下水由于补给有限，基本上属非再生性的水资源，且找水难度较大，因此许多干旱国家或地区十分重视加强地下水的勘查研究并取得了成效。

1）进展和突破

近几十年来，在干旱、半干旱区地下水资源的研究取得不少重要进展和突破[1]。哈萨克斯坦编制了干旱区自流水和潜水预测图，发现和评价了70个自流水盆地和大量潜水，总面积达150×10^4 km²；高质量地下水储存量达8×10^{12}m³/a，其天然补给量为450×10^8m³/a，预测其可采资源为1960m³/s。在中东和北非地下水已成为该区最主要的水资源，如撒哈拉大沙漠盆地深部地下水储存量达15×10^{12}m³/a，天然总补给量可能超过250×10^8m³/a，可灌溉70×10^4hm²沙漠土地。美国亚利桑那州60年中在该区各含水层中共采出2250×10^8m³的水，其中90%为深部地下水。澳大利亚大自流盆地中本世纪内已开采出350×10^8m³以上的深部地下水。伊朗抽出的地下水不少于1600～1700m³/s，灌溉着约250×10^4hm²的土地。一些阿拉伯海湾国家（如沙特阿拉伯、科威特、巴林、卡塔尔和阿联酋等）自50～60年代以来，所采取的地下水相当于其用水总量的70%以上。美国西南部的高

[1] 贾跃明．1995．国外干旱区地下水资源勘查开发利用现状与趋势：概述．见：《西北地下水资源特别计划》国外情报汇编之一．1-2，43～47．

平原区，包括8个州，从深部奥格拉拉含水层抽取的地下水，有95%都用来灌溉近447×10^4hm^2的土地，使其成为美国最重要农业产区之一。

中国的西北、华北干旱、半干旱区属温带和暖温带，是世界中纬度干燥带的重要组成部分。这里的地下水成因有现代溶滤水和古代沉积水两种类型，以前者为主。现已查明西北干旱区地下水可采资源为470×$10^8m^3/a$，仅占全国地下水可采资源总量的1/6，而西北地区面积约330×10^4km^2，占全国国土总面积的35%。近年来在新疆塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区、宁夏南部山区、陕北能源开发区、内蒙古额济纳平原等地找到了可供直接饮用的优质地下水，获得干旱地区找水新的突破。

1996年第30届国际地质大会设有"干旱、半干旱地区地下水"专题讨论会，有不少论文讨论了干旱区地下水研究的总体战略思想以及利比亚、博茨瓦纳及中国的华北、西北等干旱区的研究实例。实例突出的是扩大干旱、半干旱地区井群采水效率的方法。但是干旱、半干旱地区地下水有其特殊的问题存在，需要从理论上、勘察技术方法上、合理开发利用等方面深入研究解决。

2）深部地下水的形成和评价问题

哈萨克斯坦水文地质学家结合他们的实践突破了原有对干旱区地下水形成理论的认识。按照以前沙漠区地下水为水汽凝结形成和原生（封存）形成理论，在沙漠地区只能形成储量有限的透镜体状水体。通过深入研究"查明地下水的主要补给区和补给源大部分位于潮湿的山区，成功地证实了自流水型和潜水型地下水径流和水资源是由大气降水渗透而形成的"。这一理论观点的突破为在沙漠区预测和查明大规模地下水储量奠定科学的基础。

在世界大多数干旱地区下面普遍分布有大型的沉积盆地，如撒哈拉大沙漠盆地、澳大利亚大自流盆地、塞纳-内盖夫盆地等。其中蕴藏有丰富的地下水。但对其运移机制有不同认识[1]，即是否存在水力连续性问题。采用不同的水文概念模型，即采用径流模型（以水力连续性为基础），还是采用滞留模型（以水力不连续性为基础），其研究结果不同，其计算年龄可超过一个数量级。加拿大J. Toth是第一个持有水力连续性观点的学者，法国P. J. Margat，英国J. W. Lloyd以及美国等水文地质学家亦以水力连续性作为基础研究沉积盆地的地下水。但在石油领域中一些学者，以以色列E. Mazor为代表的学者在1995年即提出，在地下深部，随着温度、压力、岩石压实作用的影响加大，不同含水层之间的相互联系几乎不存在，因此采用滞留(Stagnant)含水层的概念来研究沉积盆地中地下水的圈闭体。有关沉积盆地水力连续性及滞留含水层是否普遍存在的问题，直到今日仍是地下水理论与实践以及科学问题研究的主题和焦点。它涉及到干旱区大型沉积盆地地下水的评价、开采以及水资源的管理，它与较开放的浅部含水系统有很大的不同。

对干旱区深层地下水的评价方法目前有：①同位素方法。可研究地下水的形成机制、补给来源、流动路径及可能发生的入渗、混合及水-岩相互作用。如D、T、^{14}C、^{18}O、^{36}Cl仍普遍用来研究地下水的补给机制。锶的同位素在深层地下水评价中逐渐显示出其重要作用。②数学方法。如以色列采用主成分分析法（PCA）、聚类分析法和混合单元模型等，对零散的多变量信息进行整理、评价和建立模型。③现象学方法。以直接观测和测定地下水系统

---

[1] 张丽君．1997．国外干旱区地下水资源勘查评价方法现状与进展：综述．见《西北地下水资源特别计划》国外情报综合研究之二．1～12．

的物理、化学、地质和水文等特征资料进行综合分析，可获得较全面的认识。

3）干旱区地下水勘探技术和管理

由于干旱区地下水埋藏深，找水有相当的难度。近年来勘探技术有了很大进展。如借助遥感与GIS技术来确定地下水开采有利地区，从而大大地提高了布井成功率。英国、瑞典、美国、德国都有成功的经验。此外，从英国和欧美一些国家在非洲结晶岩基底地区找水经验来看，采用先进综合性的勘探技术方法，如磁测、甚低频、激发极化法、电阻率测深、核磁共振（NMR）和测井方法等，亦可较快较好地找到地下水。

对于干旱区宝贵的地下水资源，如何合理科学地开发利用和管理，必须是在弄清水资源的分布规律和特征及对水资源作出正确的评价基础之上，否则将带来资源枯竭、生态环境和水质恶化等严重的不良后果。当前一些水文地质学家认为干旱半干旱区地下水资源科学管理的核心是加强能力建设。所谓能力建设是指“提高全民素质，动员社会共同参与的一个向决策层提供信息服务和必要的水问题科学宣传，向用户及群众提供科学普及服务并进行宣传教育，向水资源工作人员进行技术传授、培训和提高等各个方面工作的系统建设”。

在干旱地区为了扩大供水量，需修建一些地下水工程，如集水井、人工补给蓄水坝、池等。但联合使用、合理调配地表水与地下水是干旱区水资源管理的主要发展方向。

3.3.4 弱透水岩层的水文地质学

低渗透性或称弱透水岩层水文地质学属水文地质学的一门基础性学科分支，理论性和方法试验要求较高，难度也较大，是目前水文地质学研究的前沿。

低渗透性岩层的水文地质研究近年来获得了前所未有的重视和发展，这与高放射性核废料储存，世界能源结构核能比重的增加有密切关系。研究的中心问题是在低渗透性岩石中地下水的流动与溶质（放射性物质）传输，包括野外研究、室内试验、野外大型现场试验、参数求取、数值模拟等。这类岩石有结晶岩、粘土及蒸发岩等。目前以北美与欧洲各国研究程度较高。最近10年来的国际地质大会论文也反映了这种现状，在第30届国际地质大会上也是美、加、法、比、西班牙、丹麦等国论文居多。

美国学者研究了沉积盆地中液相运移的古水文地质条件和形成一些有价值的矿产资源，讨论了沉积盆地中地压的形成和演变以及非均质岩石中低渗透率K与岩石结构的空间变化关系。他们还进行了低导岩石水力性质的野外测定，甚至在凝灰岩地区建立试验站。当然这种试验难度是较大的。当前研究裂隙岩水力特性的最新进展主要是把地质的和地球物理的方法结合起来建立三维流模型。德国进行了在低渗透性粘土层中水流线的观测试验。

关于低渗透性结晶岩需要进一步研究的水文地质问题，美国Chin-Fu Tsang指出有5个：①测试方法。由于裂隙水流比岩石基质的水流大几个量级，因此不能采用常规抽水试验。通常用注水试验和压力下降试验，并发展了测量低水流速度的技术。现仍需要在岩石裂隙的力学性（张开或闭合）和注入水压力关系方面进行研究，包括有效地测定裂隙的水力传导率。②野外试验解析技术。低渗透性裂隙介质的水力传导率空间上变化很大，应研究对野外井试数据进行仔细的解析和复核方法。③物理作用过程。在低渗透性介质中除已知的一些作用过程外，还应附加4个影响因素：一是单一裂隙的缝隙变化；二是通道水流或集中水流的存在；三是示踪剂在基质中的扩散作用，这是个缓慢过程；四是耦合的热-水机械作用，导致裂隙的开启或闭合，从而改变水力传导率。对这些作用过程虽有不同程度

的了解，但在模型研究中的技术处理仍在发展之中。④模拟技术。一般采用裂隙网络模型和随机连续模型。如何用随机模型了解野外试验，校正参数，模拟物理现象还存在问题。⑤预测模型战略。对地质建造中与溶质流动和传输有关的水文作用，包括弥散及其比例关系、基质扩散、通道水流和密度驱动流问题尚不清楚，与预测模型有关的科学问题，包括如何获得适当的边界条件以及有关系统的长期方案(时空变化)；如何掌握地质系统的非均质性；如何开发该系统的概念模型，如何将与有效数据一致的概念模型结合在一起等正在研究中，目前还缺乏对 10^4a 情况进行预测研究的经验。

3.3.5 地下水地球化学及同位素研究

地下水地球化学是水文地质学的基础学科，最初以研究地下水的化学成分及其形成为主，以后逐渐发展至地下水成矿、寻找油气及有用矿床，如放射性铀矿、钾矿等领域，近代在与人类密切相关的生态地质环境领域中起着越来越重要的作用。

第 30 届国际地质大会有关地下水地球化学的论文内容涉及水岩平衡计算，建立模型以解释区域地下水的起源；农业灌溉水化学，特别是土壤和地下水盐碱化过程；沿海地区地下水的化学成分形成及演化过程；地热水化学以及核废料处理选址的水化学研究，加拿大专家发现可用铀元素浓度评价氧化还原环境并建立相应方法。在还原环境中铀元素的活性小，放置废料保险程度大。

同位素方法已成为水文地球化学中重要的有效手段，近年来获得较大进展。"当前研究的热门方向是对大型地下水盆地和岩溶水系统进行长期的综合（水质、同位素）监测研究。罗马尼亚在南道布鲁日灰岩山区建立了有 50 个台站的监测网。从 1993 年起已积累 2 年多 2500 组数据。每组数据包括物理、化学、生物、同位素指标共 44 项。通过数据分析，①圈出了污染敏感地段；②发现含水层深部存在硝化作用；③硝态氮中 ^{18}O 与 ^{15}N 都有识别氮污染源的重要功能。俄罗斯应用多种同位素研究地下水系统对人为污染的敏感性，已取得系统性成果"。中国从 1985 年开始对全国陆域大气降水（20 个台站）进行连续监测。对大气降水氢氧同位素时空分布规律进行研究，并建成数据库，汇入国际原子能机构的全球大气降水氢氧同位素数据库。巴西首次测定了 Parana 盆地地下水中的氦同位素，应用氦总含量和 $^3He/^4He$ 的比值（大气起源水为 1.4×10^{-6}，地壳水为 $10^{-7}\sim10^{-8}$，地幔水 10^{-5}）两个指标可识别地下水起源，研究地下水流动途径和测定地下水年龄。

3.3.6 水文地质学的发展方向

（1）传统水文地质学的研究对象和领域进一步扩大到整个水圈，并参与到与其它地球圈层——岩石圈、生物圈、大气圈的相互影响、相互作用的领域，成为全球变化研究的重要组成部分。即使在水圈里，也是着眼于整个系统，地表水与地下水的统一研究，人地系统中人类与地下水环境的相互作用研究，引起地下水圈生态效应的变化的研究。俄罗斯水文地质学家提出生态水文地质学的新概念，目的是提出管理地下水圈体系及其质量状态的方法。从时空角度不仅加大了深部（层）地下水研究，而且回溯到过去地质历史时期的古水文地质研究。

（2）在水文地质基础理论方面，由于引进了现代新的科学理论，如系统论、非线性动力学、耗散结构理论以及应用数学、同位素技术等，使地下水的一些理论问题，如地下水的形成、年龄和地质循环、水-岩相互作用、地下水的数值模拟（渗流、水量、水质、溶质运移、弥散等）、弱渗透介质中水文地质问题等研究将进一步深入和发展。后者涉及非稳定

流在非均一介质中的运移问题，需要建立对未来多少年的流体和溶质的传输预测模型。但这些科学前沿的理论研究还需要其它学科的协作，如放射性废物地质处置库的设置就需要水文地质学、岩石力学以及热传导和热动力学领域的科学家来共同解决。地下水和地质作用关系问题越来越受到关注，它对于金属矿床、矿化带的形成和地震预报有着特别重要的意义。

（3）多学科交叉协作形成的环境水文地质学的发展将更为迅速。它包括了区域环境、污染环境、医学环境和生态环境的水文地质研究。区域环境水文地质主要对区域环境水文地质条件和存在问题进行综合分析、评价和趋势预测，为环境规划或国土整治服务。有关地下水污染的机理、预测、控制和治理是环境水文地质的主要研究内容，是当前水文地质的研究重点。特别是污染治理措施的研究，需要多学科的协作，如国际上兴起利用土壤微生物来降解某些污染物的生物补救措施。它不仅依靠对水化学条件（如含水量、pH 值等）的了解，而且控制生物降解的营养素有效性又受到地下水水流和运移过程所控制。这就需要微生物学、地球化学、水文学等方面的学科知识来共同解决。美国 DOE1995 提出一个跨这 3 学科的 10 年研究计划，内含 7 个研究单元，通过建立野外研究中心，综合数据，为最佳生物补救措施完善分析系统等途径，而水文地质将在其中起到重要作用。由于水资源日益紧缺，如何科学合理开发利用和管理，解决开发地下水资源引起的环境问题，有称之为资源环境水文地质学的，这些都是应用性很强的分支学科。

（4）新技术、新方法在水文地质中的应用将进一步扩大和加强。地理信息系统（GIS）可应用到地下水决策支持系统，地下水规划和管理，模型研究，水质监测，含水层识别，水源保护，利用遥感图像和数据进行地下水研究、编制水文地质图等方面。

（5）水文地球化学在以下领域内将进一步发展：一是结合环境质量评价要求，进一步对地下水水质及其变化、污染机理和预测、防治措施等进行研究；对于地下水中可能导致地方病病因一些有害微量元素的形成、运移、富集规律从室内模拟实验到区域实地调查、观测；对现今污染水中大量复杂的有机物质、生化物质的发现和治理的研究将促进水文地球化学提高到一个新的水平。二是用水化学和同位素方法综合研究地下水系统，在研究地下水的演化和 100 年以上尺度的水文地质事件和条件以及高放核废料处理选址方面。水化学同位素的研究对于解决地下水补给、深层水起源和地下水年龄以及热液成矿机理有着不可替代的重要性和发展前景。

3.3.7 我国的水文地质研究展望

中国水资源总量为 $2.8\times10^{12}m^3$，居世界第 6 位。但人均占有量仅 2300 m^3，不足世界人均值的 1/4，排位第 110 位。全国有 300 多个城市缺水，其中 188 个严重缺水，预计到 21 世纪 30 年代前后，缺水总量为 $2300\times10^8m^3$。水资源的危机在威胁着居民的生存。

我国地下水资源有 3/5 集中在北方各大平原和盆地，其中东北、华北地区地下水可开采资源量占 62%，西北地区仅占 25%。地下水开采量逐年增加，90 年代末已达 $1000\times10^8m^3$，由于对地下水开发缺乏规划和保护，以致造成污染和超量开采带来严重的恶果。

因此无论从水文地质基础理论，还是从改善水环境质量，保证水资源尤其是地下水资源为社会可持续发展服务的目的，我国重点应发展：

（1）从区域上加强西北干旱、半干旱地区地下水、西南岩溶地区和黄土地区地下水的调查、勘查与评价。西北干旱区水资源存在量不足，分布不均，严重浪费，水质恶化等问

题。1995 年启动的“西北地区地下水资源特别计划”已取得丰硕成果。但要从整体上解决，还应将地表水和地下水作为统一系统来合理规划、开发。黄土高原和岩溶地区都是生态环境脆弱地区，石漠化（岩漠化）、水资源短缺和生态环境恶化都是制约经济发展的因素，急需开展综合治理、勘查、开发岩溶水的研究。

（2）从管理上要加强对水资源的科学规划和管理。历史上对水资源的管理体制，一直把地表水和地下水的开发利用分割开来，而不是统一调配和规划，使有限的水资源不能得到最合理有效的利用。应该是上游下游统筹兼顾，浅层水与深层水综合利用，地表水与地下水联合开发，充分挖潜，合理布局。中国科学院地学部专家认为，中国水问题的根本出路在于“以节水为本，强化统一管理”，并指出：全方位（包括农业、工业、矿业、城市、生活等方面）节约用水的潜力很大。而要达到节水目的必须统一管理，从体制到立法都要改进、完善和加强。相应的还要把水资源管理模型的研究继续深入。节约用水应成为基本国策。

（3）从科技上加强地下水的污染治理与节水技术的研究。我国在这方面的研究还很薄弱。如何因地制宜，采用有效的治理方法，尤其采用既经济又能自然净化环境的生物治理方法，应成为环境水文地质学的重要研究方向。提高节约用水的科技水平，加强节水新工艺、新技术、新方法的科技研究，并推广到工农业、城市生活用水等各个方面。

（4）从学科基础理论方面，要进一步研究承压水的越流理论、潜水的延迟给水理论、裂隙孔隙的双重介质理论、粘性土（弱透水层）渗流理论、非饱和渗流理论等。“八五”期间已开展了“人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展”等涉及大陆水圈与全球变化的研究，取得重要的成果。在 21 世纪初应进一步加强地下水的渗流理论研究，结合现代科学，开展各种模型研究，特别在复杂水流条件下如何正确概化，选定边界，确定边界条件，建立数学模型；地下水中溶质化学反应的数值研究；包气带、非均质介质、高矿化度等条件下水流运动规律和溶质运移原理，提高地下水的定量研究水平；加强地下水在参与地质过程循环中水-岩相互作用中的机理研究等。

3.4 工程地质

人类社会经济活动的发展和能源、资源的开发，提出了许多技术要求很高，地质条件又极复杂的重大关键工程地质问题，对应用性、综合性很强的工程地质学科是一个极大的挑战，促使了现代工程地质学的理论方法体系和工程实践上都有了很大的进展。

3.4.1 重大工程建设的工程地质研究

近几十年来众多的大型工程建设项目纷纷上马兴建。在水利水电工程地质研究方面，如 1996 年第 30 届国际地质大会报道的希腊 Evinos 高坝及 29.4 km 长的引水隧道、土耳其幼发拉底河梯级大坝工程、我国的长江三峡工程、黄河小浪底工程等。三峡工程的前期地质勘察研究工作已开展了 40 多年，主要集中在坝址（坝区）比较、区域稳定性和地震活动性，水库工程地质、环境地质及库岸稳定性，水库移民迁建工程地质、环境地质问题，水库诱发地震问题，坝址及建筑物工程地质水文地质问题，天然建筑材料等 6 个方面。研究工作涉及地球科学中近 10 个学科。工程于 1994 年 12 月正式开工，1997 年 11 月大江截流成功。在铁道工程地质特别是深埋长隧道建设方面，据国内外数十个隧道工程实例统计，最长的

达 19.8 km，最大的埋深达 2480 m。遇到的地质灾害问题就有高地温、高地应力、涌水突泥、地震震害、有害气体等。采用了工程地质、水文地质、遥感地质、地球物理勘探、构造应力场分析等综合勘探技术，为隧道建成积累了丰富的经验。在沿海港口建设方面，如为香港沿岸港口及机场的扩展开展了近海地质调查，取得了大量的地质信息，奠定了建立地质资料库及编制基础图件的基础，并成功地应用于填海造地、挡海墙、防洪堤、海底斜坡及管道等的设计和建设中。其它如直布罗陀海峡通道工程、法国阿尔卑斯高速公路、荷兰海岸工程、加拿大达林顿核电站等在工程地质领域的实践方面都代表了最新的国际水平。

以往重大工程的工程地质研究主要放在前期论证上，如对坝址的勘测、分析、工程地质条件的评价、预测等方面。工程建设过程中的问题是施工部门的事。现在几乎所有的大型工程建设自始至终甚至建成以后都要求工程地质工作者的参与，从而大大的促进了施工工程地质的发展和工程地质研究领域的拓宽。实践证明，施工阶段可以加深、验证前期对一些工程地质条件和问题的认识。同时，快速采集、分析施工阶段所揭露的大量地质信息，可及时反馈修改设计，指导施工，这种信息化施工可以收到很好的效果。

3.4.2 区域地壳稳定性研究

为重大工程选址服务的区域地壳稳定性研究，由于现代建设的重大工程越来越多，难度、规模也越来越大，涉及地下、水下的深部，因而获得了长足的发展。尤其是中国，在核电站、大型水利枢纽、重要城市的建设中，其场址的区域地壳稳定性研究走在国际研究的前列。

从 60 年代发展至 80 年代，我国逐渐形成了比较完整的区域地壳稳定性评价理论和方法。如“地质构造控制论”、“安全岛”理论、“区域稳定工程地质”。90 年代这些理论观点进一步完善和系统，并出现了“优势面理论”以及“断裂的调节阀”机制等其它多种学术观点。近年来，国内进一步提出了重大工程选址的“安全岛”多级逼近与优选理论，其基础是板块构造、岩石圈动力学和地质力学，基本要点是把地球表层地块及其边界断裂划分成多级多段，通过由大到小的步骤，逐级研究并比选出同级中相当稳定者。

区域地壳稳定性当前采用的主要研究方法有地质比拟法，物理模拟方法（使用较多的是光弹模拟，泥巴模拟等）以及数学法与人工智能方法等。同时开始广泛应用地理信息系统作为区域地壳稳定性评价的工具。

90 年代初建立了区域地壳稳定性评价专家系统（CRUSTAB)，该系统对福建马尾开发区场址，黄河黑山峡大柳树坝址和广东大亚湾核电站厂址的区域地壳稳定性进行了评价和应用。此外以刘国昌从事区域稳定工程地质的成果和经验也建立了专家系统。利用该系统可求解区域活动断裂评价，工程活动断裂评价及分类，潜在震源的识别与地震危险性分析及区域稳定评价。该系统对秦皇岛地区区域稳定性评价进行过验证。通过对 1∶500 万“中国大陆区域稳定工程地质图”的编制，揭示了中国区域稳定工程地质的基本特征与规律。

区域地壳稳定性的研究在国际上已受到重视。在 1996 年的第 30 届国际地质大会上，中国、俄罗斯、日本、美国、印度和意大利等国都有论文交流。其基本特色和重要成果为：①区域地壳稳定性在传统的分区分级评价基础上，采用了风险模型，对重大工程场址进行了风险性评价。②运用层次分析方法，定量化地编制了中国区域地壳稳定性分区评价图。图分 3 个层次，分别采用模糊综合评判、模式识别法及 CRUSTAB 专家系统，进行了稳定程度 4 级划分，在不稳定地区中圈出相对稳定地块，并对重点地区作了深入全面评价。③新

理论、新方法的引入。除了传统的地质力学理论外，会议上还交流了基于岩石圈动力学、板块构造理论等进行区域地壳稳定的评价。

对影响区域地壳稳定性的主要因素——活断层的研究多侧重于断层的几何特征、活动速率和地震活动特征等方面。与活动性评价有关的断层活动速率研究表明，尤其是全新世以来还在活动的断层，其活动速率越大，一般其地震危险性越大。对于断层能达到的最大活动程度，断层的失稳程度，地震时间逼近度的确定也进行了探讨。据此可综合评判活动断层以及不同段落的地震危险程度，验证效果较好。

3.4.3 核电站及核废料处置选址工程地质

核能作为一种新型的能源，它的开发越来越受到各国的重视。但是核电站的建设对场址的水文、工程地质条件和环境有很严格的要求。如核电站场区 8 km 范围内不能有活动断裂，要对场区地面运动特征，所在地块的相对稳定程度，潜在的地质灾害（滑坡、地面塌陷等）进行评价。否则核泄漏事故将会造成重大的经济损失和人员伤亡。因此各国在核电站选址工作中十分谨慎，做过细的水文工程地质研究，以确保万无一失。

国内外核电建设的工程地质工作内容有：核电厂工程勘察设计阶段的划分，核电厂选址的地质地震调查，能动断层的调查与评价，设计基准地面运动及其推导方法，厂址区的水文地质，地基勘察、试验与稳定性评价，反应堆厂房周围边坡的勘察、试验与稳定性评价以及核废料处置场的工程地质研究（古迅，1995）。

国外如美、俄、德等都有这方面建站的经验。加拿大的达林顿核电站始建于 1978 年。4 个发电机组（4×950MW）分别在 1990 年到 1993 年安装完成。因该场址区处于板块内环境中，其抗震设计与在板缘地震环境下不同。在第 30 届国际地质大会上有论文专门介绍了达林顿核电站的工程地质及地震构造勘察和评价方法。日本探讨和评价了可能地震和可信地震的概念和指标。中国除了在广东大亚湾、浙江秦山已兴建核电站外，在天津、辽宁、江苏都进行了核电站选址的工程地质研究。天津核供热站的选址与评价，应用了“安全岛”区域地壳稳定性理论和方法，利用人工地震剖面和埋深基岩标的监测数据，评价新选场址属于地壳稳定区。在核电站选址评价中，需要进一步加强区域地壳稳定性与地震裂度区划的对比研究以及深部断裂的研究，特别是壳层断裂与岩石圈断裂活动性的研究。

核废料处置主要是地质处置，涉及储存库选址的工程地质调查，主岩岩性的选择，区域稳定性论证，地质屏障的安全性和要求地质环境的稳定和保护。国际上有关组织如国际原子能委员会对此十分重视。1988 年即开始组织协调发达国家澳、加、德、日、荷兰、波兰、瑞典、英、美等国进行研究（试验和模拟）。欧共体也支持和执行有关放射性废弃物管理，特别是地质处置的研究开发项目。如 1990～1994 年的目标是参加设计地下建筑、运转、可行性证实。根据国际经验，选择一个核废料储存场，周期长，耗资巨大。中国已开始建核电站，对核废料（中、低放）的地质处置已开始进行实质性的场地特性评价，但对高放核废料的地质处置研究仅确定了几个预选区。目前，核废料地质处置的理论方法技术都有新的发展。在第 30 届国际地质大会上交流了超深孔处置技术，减少废料库泄漏的水力梯度调节技术，选址准则和场地勘察方法。

3.4.4 工程地质力学的建立与进展

60 年代中国学者在大量工程地质实践的基础上，认识到构造的重要性，从而提出了“岩体结构”的观点。同时，法国的岩体力学学家 Muller L 等也认识到岩体结构的重要性。

70年代谷德振等提出“岩体工程地质力学”的新概念。它以地质历史的发展过程——建造与构造，并运用地质力学观点，研究了岩体的工程地质特性及力学的成因问题。它包括了岩体结构的解析和表征，岩体结构的力学特性和效应，工程岩体变形破坏机制的分析，工程岩体稳定性的预测和评价等一系列问题。现已初步建立了工程地质力学的理论体系与研究方法。俄罗斯学者最近认为应考虑土体结构。这样工程地质力学就应将岩体和土体的工程地质力学都包括在内。

80年代岩体工程地质力学进一步发展，提出了岩体结构力学新概念。它主要研究地质模型的力学效应，即把地质模型转化为力学模型，在此基础上进一步将力学模型与岩体变形破坏机制有关要素，转为定量的数学语言表达，进行岩体稳定性的力学分析，作为工程设计的依据。

对于土和土体的工程地质研究，最初是把土作为连续介质，但由于土的特殊物质组成和结构连接，其应力-应变关系为非线性随时间变化的流变状态，因此不仅从宏观力学上用模型方法，而其从土的微观结构，通过各种结构类型加以量化，建立土的微观力学模型，这在国内外都取得了相当大的进展。

中国对软土、黄土等特殊性土以及软岩、泥化夹层的流变特性和模型研究，解决不少实际工程中土体变形、地基稳定分析等问题。土的微观结构研究由于测试技术的发展，在80年代进展较快。取得的重要成果有：制样技术上由风干法发展为冻干法，探讨了土的结构对其蠕变及强度的影响，对粘性土及一些特殊性土的微观结构和工程地质性质关系，以及对微结构的计算机图像处理技术等。近年来工程地质学家认为土体结构既然对其工程性质有重要制约作用，就应把建立土的结构性本构（计算）模型作为核心问题，提出发展“土体微结构力学”作为土体工程地质研究的新领域。

工程地质力学的发展要求地质研究与工程高度结合，发展工程结构和地质结构的依存关系和相互作用理论。近年来王思敬等采用系统科学原理，提出了工程地质力学综合集成理论和方法（The Engineering Geomechanics Meta-Synthesis，简称EGMS），以期使工程地质力学的定量评价和预测提高到新的水平。

3.4.5 环境工程地质学的兴起与进展

传统的工程地质学的主要任务是对工程建设的地质条件进行评价，为保证工程建设的安全而作为设计施工的定性依据。但现代人类工程活动的规模和数量越来越大，导致对周围地质环境的影响越来越大，产生许多负效应，这给工程地质学的研究提出了新的重要任务，就是要对工程建设作用于环境地质条件所产生的影响作出评价和预测。这种作用不仅是单向的，通常还是双向的。就是要研究人类工程活动和地质环境的相互依存、相互制约、相互作用关系。在1980年第26届国际地质大会上，国际工程地质协会就发表了工程地质学家参与解决环境问题的宣言，从此以后，环境工程地质学开始蓬勃发展起来。所以环境工程地质学的兴起是比较晚的。对于环境工程地质学的地位虽然还有不同的看法，如有的认为这是工程地质学的新发展的学科分支，也有的认为是工程地质学发展的新阶段和新方向。但毋庸置疑，对环境工程地质学的重要性和研究内容的认识基本是一致的。

地质环境对人类工程活动的制约，王思敬归纳为5个方面：宏观环境、地质灾害、岩土地质、水文地质、次生地质。它们通过对工程地区的区域稳定性、深部稳定性、地面稳定性、山体稳定性和围岩稳定性而直接影响到工程的规划、选址、设计、施工和运行。而

人类工程活动对地质环境系统的作用方式是通过工程荷载、岩土开挖、水流、水体调节和工程热力作用进行的。人类工程活动与地质环境系统在相互作用中的物质交换、能量交流，主要体现为加载、卸载、渗流和热流等四大作用。相互作用所产生的环境效应可以有正负两方面。重大的环境工程地质问题诸如矿山开采引起的地表沉降、地下塌陷、滑坡崩塌、占用农田土地资源、泥石流、尾矿坝的稳定性及其环境问题；兴建水利水电工程引起水库诱发地震的评价和预测；公路、城市建设的环境地质工程质量等。因此环境工程地质研究的核心应是人类工程活动与地质环境的协调。为此建立了地质环境评价指标体系。通过不确定性数学方法，选择或建立地质环境适宜性评价模型，对地质环境的敏感性进行评价预测，在此基础上进行工程活动与地质环境的协调分析，并采取相应的对策。

3.4.6 高陡边坡稳定性、滑坡预测预报及地面沉降等专门问题的研究

（1）由于当前矿产资源的寻找已由浅部转向深部，在矿山的开发中，露天开采转向开采深部埋藏的矿床，同时，一些长期开采的老露天矿山也逐渐转入深凹矿山，因此高陡边坡的稳定性成为深凹露采的突出问题。通常高陡边坡特指边坡高度在 500 m 以上，边坡坡度在 55°以上。中国在露天矿边坡稳定性研究方面有不少理论建树和工程实践。70 年代通过金川矿的实践，建立了边坡稳定性判据的原理和方法，即以岩体结构特性为基础，地质构造控制为纲，应用赤平极射投影，实体比例投影法作为边坡稳定性简便的作用分析方法。80 年代又建立了岩质边坡变形破坏的地质模型，90 年代更强调工程地质工作的重要性和多种分析评价方法的综合评价。在高陡边坡的勘测（岩心定向钻探）、模型的建立、物理与数值模拟（如地质力学物理模拟和有限元、边界元与离散元耦合分析）以及边坡加固方面均有突破性进展。近年来分形理论开始应用到边坡稳定性的研究中，它对边坡变形破坏机理分析及地质模式定量化描述有实际意义。

高陡边坡的稳定性有其特殊性：边坡岩组和岩体结构复杂，受地应力和地下水的影响导致边坡应力状态复杂，因此进一步研究高陡边坡稳定性应从①地表与地下中小型构造关系与规律，如何通过地表工程地质勘测推断地下构造，特别是软弱结构面的性状与分布；②研究节理化岩体及软弱结构面的组合，以建立适合的地质模型和力学模型；③岩体的赋存环境因素，主要指地应力与地下水和人类工程活动（开挖、采动）的影响；④边坡岩体应力状态；⑤边坡变形破坏机制的分析等 5 个关键性问题深入研究，争取有所突破（许兵等，1992）。

（2）滑坡发生时间、滑坡活动强度和滑坡危害的预测预报，正如地震的预测预报一样，其诱发因素的复杂性及变化的随机性、不确定性，也是难度很大，至今还有不少关键问题尚未解决，有待探索和完善。目前较成功的滑坡预测预报方法主要还是以地质分析、经验判断为主，并基于监测资料的趋势定量预报。如滑坡变形前兆的现象预报，位移-时间曲线变化趋势判断，以及以应变速率为基本参数的预测预报法等。这些方法对临滑预报较为有效。80 年代发展起来的统计数学模拟法、黄金分割法和 90 年代提出的非线性动力学模型预报法主要用于对已发生的滑坡作反演拟合预报，事后验证效果较好。如应用分形理论，求出各种分维值，发现信息维、容量维、关联维与滑坡演变阶段的对应关系有一定的规律。因此，“以地质研究为基础，探寻滑坡变形在宏观上的几何规律，微观上的物理、化学规律及数学上统计规律，仍是未来滑坡滑动时间预测预报研究的目标”。对于滑坡活动强度，包括滑速和滑距的预测预报方法有质点运动学和滑坡运动机理研究与质量运动学相结合的两种

类型，但都不够成熟。“如何将质点运动物理学理论和能量转换与守恒定律更合理地用于滑坡运动特征研究，是今后的主要研究趋势”（文宝萍，1996）。

（3）五六十年代国内外即开始地面沉降的研究，至今已分别召开过4次地面沉降学术讨论会。我国在研究地面沉降机理及控制沉降治理方面达到了较高的水平，走在国际的前列。目前如上海、天津等已进入以数学模型预测为主的动态微量控沉阶段（年沉降量约1～2 cm）。我国将地面沉降地质成因划分为5种沉降地质模式，据其不同特点进行勘察。对于沉降机理的研究侧重粘性土的微结构定量特性与主要工程地质性质的制约关系以及粘性土中孔隙水的运移问题。长春地质学院提出粘性土中孔隙水渗透规律的实质是“涉及两种孔隙通道中重力水和结合水相互转化问题”。在地面沉降计算和预测方面取得的重要进展是考虑了有越流产生（以往假定无越流补给而建立水位模型），并有粘性土中的释水补给含水层条件下建立的三维水流模型与一维固结沉降模型耦合而建立的数学模型，经实际应用效果良好。

专家们认为今后地面沉降研究的发展趋势为进一步引进非线性科学，以粘性土中孔隙水的运移规律为重点，探讨土结构变化-孔隙水运移-物理力学性质变化之间的联系，获得最大限度合理开采地下水资源的最佳地下水采灌量方案，使我国地面沉降的研究和控制达到更高的水平（阎世骏等，1996）。

3.4.7 工程地质学的发展展望

21世纪可以预计的大型工程建设，如跨流域的调水工程、大型水电工程、深部露天采矿工程、地下工程、海洋工程等，其可能发生的复杂的工程地质问题，从理论到设计、施工实践，从预测到防治，需要我们作为重要研究方向，在原有认识和经验的基础上，进一步去创新发展，与其它多学科联合攻关。

（1）岩、土体工程地质力学的理论方法体系还应进一步发展

工程地质力学具有我国的特色，并在工程实践中获得了广泛的应用。研究岩、土体稳定性中的关键问题，如节理面的各种工程地质特性，区域构造应力场和工程区实测点地应力场的研究，岩体稳定性的时间尺度，根据岩体变形破坏的实例建立“地质模型”等（孙玉科）。此外还应进行工程地质技术的开发研究，包括地质探测技术，岩组物理力学测试技术，岩体变形观测技术和变形破坏模拟实验技术等。

（2）环境工程地质将获得迅速的发展

目前大型工程建设涉及的环境工程地质问题很多。如大型露天开采，地下开挖，深埋长隧道工程，大型水利枢纽，地下硐室，城市垃圾的处置和卫生填埋工程等的建设，就遇到前所未有的更复杂情况。如深埋长隧道工程的开挖，需要查明其所遇到的地质灾害问题的形成条件和发生机理，作出科学的评价预测。大型水域水岩相互作用导致水库诱发地震、库岸崩滑、大坝溃决、水库淤积、大面积环境恶化等问题。水库诱发地震产生的可能性及发震强度的预测难度较大。现中国学者建立了两种震级预测的神经网络模型，具有较高的预测能力。新的动向是引入突变理论，分析水库诱震机制，建立诱震的充要条件判据和地震能量的表达式，提出断层带弱化和岩体软化效应诱震的新假说。

当前环境工程地质的研究又进一步延伸向环境地质工程，即主要研究解决和处理地质环境问题的假说和方法。90年代国际环境地质工程的热点领域是各国城市化和资源开发中固体、液体、气体废弃物的排放、填埋处理以及与城市工程建设有关的环境工程问题研究。

总体来说，环境工程地质还有些基本问题，如工程环境影响场问题，工程建筑的适应度与环境灵敏度之间关系问题，环境容量问题，监测技术、环境综合分析及反信息技术等问题的研究还有待深入。

（3）区域地壳稳定性的研究

目前应进一步加深对影响和制约稳定性因素的认识。如何分析、确定和量化这些因素，直接关系到区域地壳稳定性评价由定性到定量方向发展的问题。近来有用分数维理论描述断裂和地震的分形结构，耗散、浑沌和协同学等用以描述地壳结构及其动态之自组织过程及探讨其内部的相关性。但这些探索尚处于初始阶段。此外在技术方法方面，应大力开展深部探测、监测、遥感、计算机、制图技术和深部地应力测试技术等应用研究，提高区域地壳稳定性诸因素的时空变化的量测精度。

工程地质学发展至今日，需要与现代系统科学理论思维相结合，尤其是非线性科学对于工程地质学的提高和发展具有重要意义。黄润秋根据系统科学原理结合工程地质的应用与实践，提出了工程地质问题的系统分析原理。应用这些原理可以建立地质过程的机制分析-定量评价，建立过程地质模型和模拟再现，建立过程地质分级、分类系统，认识过程地质体（或环境）和人类活动相互作用，认识灾害地质作用发展过程，描述地质体复杂的结构和工程地质问题过程，研究过程预报等。在工程地质学拓展到地质工程的新领域时，做好施工监测与信息反馈，这就是以监控-反馈原理为核心指导思想的"信息化施工"。总之，系统科学的引入，必将把传统的工程地质学推向新的阶段和新的水平。

主要参考文献

王思敬．1992．工程地质学的前沿及其拓展．见：王思敬，易善锋主编．90年代的地质科学．北京：海洋出版社，234～239．

王思敬．1997．论人类工程活动与地质环境的相互作用及其环境效应．地质灾害与环境保护，第8卷第1期，19～26．

王思敬，戴福初．1997．环境工程地质评价、预测与对策分析．地质灾害与环境保护，第8卷第1期，27～34．

毛同夏，石宏仁，张丽君．1996．区域地质环境的定量评价和预测．地学前缘，第3卷第2期，141～146．

文宝萍．1996．滑坡预测预报研究现状与发展趋势．地学前缘，第3卷第1期，86～92．

中国21世纪议程——中国21世纪人口环境与发展白皮书．1994．北京：中国环境科学出版社．

中国科学院地学部．1998．中国水问题的出路．地球科学进展，第13卷第2期，113～117．

中华人民共和国全国人民代表大会环境与资源保护委员会编．1995．中国环境．

冯彦勋，陈德基．1997．三峡工程前期地质研究与施工期地质验证．水文地质工程地质，第2期，4～6．

古迅．1995．核电工程地质（一）．工程地质学报，2．

孙广忠执笔．1992．十年来我国工程地质科学成就与展望．见：中国地质学会编．八十年代中国地质科学．北京：北京科学技术出版社，100～104．

孙玉科．1995．21世纪中国大型工程与工程地质问题．工程地质学报，第3卷第4期，1～11．

孙成权，施永辉．1997．中国全球变化研究能力评价．地球科学进展，第12卷第6期，564～573．

刘东生，郭正堂，韩家懋等．1997．当前国际古全球变化研究的主要科学问题和任务——极地-赤道-极地大断面．地学前缘，第4卷第1期，63～69．

刘传正．1997．区域地壳稳定性评价和核电站选址核废料处置的工程电站及环境地质问题．水文地质工程地质，第2期，32～34．

刘怡芬，胡瑞林，石建省等．1996．地质灾害预测防治智能决策系统设计与应用．北京：中国环境科学出版社．

刘树臣．1993．第四纪全球变化地质学．见：肖庆辉，李晓波，刘树臣等著．当代地质科学前沿——我国今后值得

重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，39～48.

朱兴贤，朱锦旗．1997．苏锡常地区地面沉降灾害与经济损失分析．水文地质工程地质，第3期，24.

许兵，牟会宠．1992．90年代矿山边坡的主攻方向——高陡边坡稳定性．见：王思敬，易善锋主编．90年代的地质科学．北京：海洋出版社，243～247.

汪民，吴永峰．1996．地下水微量有机污染．地学前缘，第3卷第2期，169～175.

李秀彬．1996．全球环境变化研究中的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向．地理学报，第51卷第6期，553～557.

吴树仁，王瑞江．1996．地质灾害与地壳稳定性有机的某些发展趋势．地质力学学报，第2卷第3期，72～74.

吴锡浩．1993．过去全球变化研究．见：肖庆辉，李晓波，刘树臣等著．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，470～473.

张之一．1990．工程地质问题的研究现状和动向．见：中国地质学会主编．当今世界地球科学动向——中国科学家谈第28届国际地质大会，124～128.

张宗祜．1991．地质环境与环境地质．北京：地震出版社，1～4.

张宗祜，袁道先．1995．我国跨世纪的重大地学问题——环境地学发展前景．地质科技管理，第5期，60～69.

张梁，郝秀英．1995．地质灾害经济学导论．地质灾害与环境保护，第6卷第2期，1～11.

陈泮勤，孙成权主编．1992．国际全球变化研究核心计划（一）、（二）．北京：气象出版社．

陈汉宗，周蒂．1997．天然气水合物与全球变化研究．地球科学进展．第12卷第1期，37～40.

陈梦熊．1994．参加“地下水资源未来危机”国际学术会议的报导．水文地质工程地质，第6期，52～53.

陈梦熊，段永侯，哈承佑等．1998．“八五”水文地质工程地质环境地质研究的主要成就与进展．地质科技管理，第2期，55～58；第3期，63～64；第4期，55～56；第5期，45～49；第6期，50～54.

陈梦熊．1995．环境水文地质学的最新发展与今后趋向．地质科技管理，第3期，28～35.

陈葆仁，吴吉春，刘淑云．1994．地下水管理模型在我国实践中存在问题的讨论．水文地质工程地质，第6期，36～39.

陈毓川，张之一，项礼文等编．1997．90年代地球科学的动向——第30届国际地质大会学术报导．北京：地质出版社．

杨志法，王思敬．1996．工程地质学一个新的研究方向．地质灾害与环境保护．第7卷第6期，1～6.

杨学洋，陈震，刘淑琴等．1997．地球内核快速旋转的发现与全球变化的轨道效应．地学前缘，第4卷第2期，187～191.

贺学海．1997．水资源管理模型的研究过程和发展趋势．水文地质工程地质，第5期，24～26.

胡海涛，刘传正．1993．区域地壳稳定性研究的后顾与前瞻．工程地质学报，创刊号，7～13.

胡瑞林，李向全，官国琳等．1999．土体微结构力学——概念·观点·核心．地球学报，第20卷第2期，150～156.

阎世骏，刘长礼．1996．城市地面沉降研究现状与展望．地学前缘，第3卷第1期，93～98.

施德鸿．1990．从应用地学与基础研究看水文地质学的发展现状与趋势．见：中国地质学会主编．当今世界地球科学动向——中国科学家谈第28届国际地质大会．116～124.

钱祥麟．1997．固体地球科学与全球变化研究．地学前缘，第40卷第1-2期，71～75.

费瑾．1996．地下淡水资源管理研究的发展方向．地学前缘，第3卷第2期，156～160.

徐卫亚，孙广忠．1992．地质灾害学．见：90年代的地质科学．北京：海洋出版社，253～257.

殷跃平，胡海涛，康宏达．1993．区域地壳稳定性评价专家系统（CKUSTAB）及其在黄河黑山峡大柳树坝址中的应用．见：地矿部环境地质研究所主编．工程地质水文地质．环境地质论文集．北京：地震出版社，100～112.

殷跃平，张颖，康宏达等．1996．全国地质灾害趋势预测及预测图编制．第四纪研究，第2期，123～129.

柴育成，田兴有，马福臣．1997．中国的“过去全球变化”（PAGES）研究跃居世界前列．科学通报，第42卷第15期，1679～1680.

郭亚曦．1997．国际全球变化计划与世界数据中心的联合行动——1997年联合数据会议及其启示．地球科学进展，第12卷第6期，574～580.

郭进义，洪业扬．1998．过去全球变化研究中环境地球化学进展．地质科学，第33卷第3期，374～379.

黄润秋．1997．现代系统科学理论与工程地质系统观．水文地质工程地质，第1期，1～6.

熊尚发，丁仲礼，刘东生．1998．第四纪气候变化机制研究的进展与问题．地球科学进展，第13卷第3期，265～270.

籍传茂，王兆馨．1996．区域地下水资源研究的进展和前沿问题．地学前缘，第3卷第2期，147～155.

Broecker W S，Denton G H．1989．The role of ocean-atmosphere recoganizations in glacial cycles．Geochimica et Cosmochimica Acta，2465～2501.

Chen Mengfang，Soulsby C．1998．英国地下水保护战略．见：第30届国际地质大会论文集（第22卷），水文地质．北京：地质出版社，205～209.

Chin-Fu Tsang，Yvonne W．Tsang．1996．Research Directions in Hydrogeology．地学前缘，第3卷第1期，43～48.

Chin-Fu Tsang．1998．低渗透性岩层水文地质问题的讨论．见：第30届国际地质大会论文集（第22卷），水文地质．北京：地质出版社，85～89.

Dansgaard W S，Johnsen S J，Clausen H B，et al．．1993．Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record．Nature，364：218～220.

1996 Geoscience Highlights（Hydrogeology）．Geotimes，1997，Feb．，37.

1997 Geoscience Highlights（Hydrogeology）．Geotimes，1998，Feb．，38～39.

International Conference on Water and the Environment：Development Issues for the 21st Century．Dublin Statement on Water and Sustainable Development，Dublin，1992.

Song X D，Richards P G．Seismological evidence for differential rotation of the earth's inner core．Nature，1996，382：221～224.

Vrba J．1998．地下水保护的战略、政策及管理．见：第30届国际地质大会论文集（第22卷），水文地质．北京：地质出版社，199～204.

第4章　基础地质

4.1　地层古生物学

地层学和古生物学是两门既古老又年轻的学科，它们具有悠久的研究历史。近年来，随着现代科学技术的巨大进步，它们又进入了新的复兴时期。在这一学科中，全世界共同关注的热点问题是：①前寒武纪古生物和地球早期生命起源与进化；②生物集群绝灭；③著名生物群的发现和深入研究；④分子古生物学的探索；⑤全球层型剖面；⑥层序地层学和⑦高精度高分辨率地层的划分和对比。

4.1.1　前寒武纪古生物和地球早期生命起源与进化

传统的古生物学以显生宙寒武纪之后的化石为研究材料，而对前寒武纪的化石知之甚少。其主要原因是前寒武纪地层中寻找化石记录十分困难，这可能是由于该时期生物原本就很稀少，或者多为软体不具硬壳难以保存，再加上古老地层已遭受多次和不同程度的破坏。但是，早期生物恰恰是认识整个生命历史的关键。前寒武纪历史占据整个地球历史的7/8，因此，不清楚其生命开始阶段和绝大部分时期的情况就无法谈及生命的起源和进化。前寒武纪古生物一直是古生物学研究的薄弱环节，但在最近几十年来，在这一领域内取得了重大的发现和突破，如一些古老生物化石的发现，可视为当代古生物学上的重要进展。

目前，在最古老的太古宙岩石中找到的生命记录有：①有机质微结构（organic microstructure）；②具有机质壁的微生物化石（organic walled microfossil）；③叠层石（stromatolites）；④沉积碳和石墨（sedimentary carbon and graphites）。但是，关于这些物质是不是真正微生物遗体化石尚有争论，仍处于探索阶段。在元古宙已有可靠的原核生物和真核生物的出现。其早期、中期以菌藻类微体生物为主，多细胞后生植物一般认为出现在1300～1400 Ma前后。最近在中国华北蓟县在约1700 Ma前的地层中，发现了可信的宏观藻类。后生动物出现原认为在元古宙的晚期，即距今约600～700 Ma前后，如最著名的澳大利亚的埃迪卡拉动物群，现除南极洲之外，世界其他各洲均已陆续发现。近年来，在中国和加拿大发现大量相当于埃迪卡拉动物群时代(600～700 Ma前后)和早于埃迪卡拉动物群（700～900 Ma前后）的后生动物实体化石。在中国徐淮地区称为淮南生物群；在辽东称为辽南生物群；在加拿大是小达尔群内的化石，这可能是目前所知早于埃迪卡拉动物群保存最古老的后生动物化石。值得一提的是，有报道称，在美国得克萨斯州中元古代阿拉莫尔组燧石层（年龄约为1200 Ma）中获得有后生动物起源方面的新证据，这是充填有沉积物的管状体，猜测为后生动物的觅食痕迹。这是否为真正的后生动物，尚待进一步研究和证实。

探讨生命的起源和进化涉及的内容很广，它不仅仅局限于古生物学，而且还涉及到生

物学、地质学、化学、天文学以及其他学科。只有多学科交汇和共同努力才能获得理想的成果。

4.1.2 生物集群绝灭

有人作过统计，20世纪在地学方面论文最多的领域就是板块构造和生物集群绝灭研究。生物绝灭现象是一致公认的现象，而争论和分歧的焦点是集群绝灭。集群绝灭是指生物绝灭现象中涉及许多门类生物的大规模绝灭。围绕着集群绝灭的原因主要的理论分歧是“均变论”和“灾变论”。持“灾变论”的学者先后提出了各种灾变假说，如地外成因的有超新星爆发、太阳耀斑、银河年、大陨石或小行星、彗星撞击；地内成因的有海平面变化、地磁极性反转、盐度变化、缺氧事件、食物链中断、火山爆发、温度变化、板块运动。灾变事件留在地层中的直接记录如铱及痕量元素异常、稳定同位素、微球粒、冲击石英、撞击坑、高温石英、火山尘碎屑物等。根据各国学者的统计，动物界在地质历史时期有7次大规模的集群绝灭，分别发生在前寒武纪末、寒武纪末、奥陶纪末、泥盆纪弗拉斯期和法门期之间、二叠纪末、三叠纪末和白垩纪末。造礁生物有4次集群绝灭，即寒武纪末、泥盆纪末、二叠纪末和白垩纪末。生物集群绝灭是分阶段呈幕式的，这种幕式绝灭有无固定的周期？有人提出中新生代有平均约26 Ma、30 Ma的绝灭周期，但也有人认为是无周期的，或虽不否定周期，但认为绝灭事件是离散的。如古生代绝灭事件的一些峰值的排列就无规则的时间间隔。绝灭有其选择性，不适存者则淘汰，导致幸存者或新生者总适应水平的提高，并为幸存者或新生者腾出了广阔的生态域。这也为许多新类型爆发式地应运而生创造了条件。

有关各时期生物集群绝灭的研究，规模最大和投入工作最多的是二叠-三叠系界线上的集群绝灭。除继续维持天体冲击假说外，近来认为世界上最大的高原火山活动，即西伯利亚暗色岩所代表的二叠—三叠纪过渡时期的火山活动可能是这一时期集群灭绝的重要原因。还有的学者最近提出，这时期集群绝灭与分层海洋对流倒转有关，海洋对流倒转使有害的CO_2带入表层水。中国华南地区亦取得了二叠—三叠纪过渡期火山爆发灾变的重要成果以及在11条地质剖面上获得了二叠—三叠纪之交可能发生过撞击事件的有关证据。

4.1.3 著名生物群的发现和深入研究

特殊的生物群，尤其是含有保存完美的软体化石的“化石库”备受国际古生物学界关注。地史时期的生物能保存为化石的可能只有万分之一，而且绝大多数是生物留下的硬体。最能反映生物真实面貌和本质特征的软体部分常常无法保存，而软躯体却能提供较全面和可靠的生物学属性信息，它在生物分类学及系统演化研究中起着决定性作用。许多生物门类的生物学研究最终也得依靠更多软躯体化石的发现，同时它还能为古生态、古生物地理、生理学、病理学、化学成分等提供可靠的信息。

近年来，澳大利亚埃迪卡拉动物群、中国澄江动物群、热河生物群鸟类化石的发现均引起整个古生物学界的震动和研究热潮，此外著名的北美加拿大布尔吉斯页岩动物群的重新研究亦取得重大的进展。

1）埃迪卡拉动物群

产于南澳弗林德斯山新元古代庞德石英岩的上部，距今约600 Ma，是隐生宙最重要的生物宝库，目前已知有腔肠动物、环节动物、节肢动物和一些分类位置不明的后生动物。最

近，有人提出其中有些化石具有坚固性（由此证明它们具有抗压实能力）、个体大（其直径可达米级）、缺乏任何明显的摄食机制以及显微结构，表明它们可能是地衣植物化石。而 A. Seilacher 则认为，这一动物群与现代生物完全无关，属于一个独立的绝灭门类，称之为文德动物门（Vendozoa），与寒武纪开始以来出现的各门类的后生动物没有演化上的任何关系。由上述可以看出，尽管该动物群发现至今有 40 年，但对其真正的了解还有很多工作要做。不管怎样，埃迪卡拉动物群的发现和研究在一定程度上弥补了以往前寒武纪晚期与寒武纪之间化石记录明显不连续的缺陷，虽然关于此动物群在后生动物早期演化中的地位问题当前还有激烈的争论，但是，它的发现不仅引起轰动，而且在世界上掀起了寻找该动物群的热潮。目前，除澳大利亚外，在非洲、欧洲、亚洲、北美和南美均已有发现。随着新证据的发现和研究的不断深入，关于该动物群的研究必将会有重大突破。

2）澄江动物群

这是我国最近十多年来震惊世界的伟大发现之一。它产于云南澄江早寒武世筇竹寺组内，是国际上显生宙最古老的生物化石库。该动物群包括水母、类水母、三叶虫、非三叶虫的节肢动物、金臂虫、蠕虫、海绵、腕足类等。许多化石已与现代生物有清楚的联系性，它的大部分可认为是寒武纪至今所出现的各种主要形体结构的先躯，其中有被认为是最古老的脊椎动物鱼类和脊索动物。也包含有现已绝灭的或与现代生物无关的奇异生物。该动物群的发现引起世界各国古生物界极大兴趣和关注，已采集标本达万块以上。化石产地除最初发现地点澄江帽天山外，在其周围许多地区以及晋宁一带又发现一些新产地，化石极其丰富多彩。它的深入研究无疑对许多生物门类“爆发式”起源及早期演化特征具有重要的意义。

3）布尔吉斯页岩动物群

北美加拿大大不列颠省中寒武世布尔吉斯页岩动物群已有百年研究历史，美国古生物学家 C. D. Walcott 连续进行了二十余年的研究，为该动物群的确定作出了重大贡献。这一动物群有大量保存完好的软躯体化石，还有许多难以想象的奇异化石。近年来，随着新技术、新方法的应用，对该动物群化石进行了重新采掘和研究。加拿大从 60 年代开始就连续组织大规模开采，化石产地增加到十余处，并与英国一些著名古生物学家合作开展研究。通过精心修复，利用扫描电镜、X 射线、红外光照像等新技术，全面显示出各生物的复原图，搞清了化石生态学细节和奇特的悬崖塌陷缺氧埋藏特征。

4）热河生物群

中国辽宁地区中生代热河生物群包含大量的脊椎、无脊椎和植物化石，近年来发现了保存十分精美的鸟类化石，其种类、数量以及保存完好程度超过德国产出始祖鸟的晚侏罗世索伦霍芬组（Solnhofen Formation）化石库。已发表的重要鸟类有中华龙鸟、孔子鸟等。关于中华龙鸟是真正的原始鸟类还是属恐龙类尚有很大的争论，但不管结论如何，其对鸟类起源和演化、鸟类与恐龙的关系将提供极其重要的信息。更令人惊喜的是，在一块标本上发现，在鸟的体内保存有胚胎（?）。在该生物群内，除鸟类外，还发现有原始哺乳类和原始被子植物化石。这丰富而重要的生物门类足以显示出该生物群的重要性，对它的深入研究必将导致古生物学上的一些重大突破。

4.1.4 分子古生物学

在现代生物学中，DNA 双螺旋结构和中心法则的发现等一系列重大成就，促进了分子

生物学的兴起和发展。在这种背景下，分子古生物学得以诞生，它以分子层次的微观方法来研究化石。目前做得较多的是对化石DNA（脱氧核糖核酸）的确定，如采用多聚酶链反应（PCR）方法从保存在琥珀中的始新世昆虫中检测DNA和从中新世地层木兰植物中提取DNA；对早期人类和西伯利亚猛犸化石DNA的研究；在中国对河南西部晚白垩世红层中恐龙蛋化石和山东新生代龟鳖化石DNA的提取和研究。上述研究都取得了一定的成果，但该项研究一定要注意化石材料和如何避免现代DNA污染等一系列问题。国外有一些实验室还对有孔虫DNA进行过排序，证实有孔虫是一种古老的独立谱系分支，并与甲藻之间有密切关系。

进行分子古生物学研究的意义在于能从分子级水平研究化石分类，完善生物起源和进化理论，加深对地质历史时期生物圈—地圈相互作用的了解，特别是碳循环的历史；而微古生物有机分子的研究对石油成因的研究也是十分重要的。

4.1.5　全球层型剖面

世界各国地层古生物学家都认识到，精确厘定全球地质年表是地质学发展的根本。国际地层委员会在70年代中期成立了各个系的分会，以便在全球范围内逐步确立界、系、统、阶这四级全球层型剖面。首先是进行系一级的界线层型的确定。最早确定的是位于捷克的志留-泥盆系的界线层型剖面。界线层型的确定采取生物地层、同位素年龄、磁性地层相结合的方法；在显生宇以生物地层为主，前寒武纪地层侧重于同位素年龄，而在第四系更注重于磁性地层。它要求单相的连续剖面，界线上无沉积间断，并要求交通便利，允许世界各国学者进入进行参观和研究。迄今为止，在显生宇中除二叠-三叠系、三叠-侏罗系、侏罗-白垩系3条界线外，其他各系之间的界线国际层型剖面都已确定。现阶段，各系的地层委员会分会已从事于系内的，即统和阶的全球层型剖面，其中泥盆系和志留系各统各阶的划分以及全球层型剖面工作已全部完成。

我国也在70年代末期和80年代初期从事此项工作，取得了很大的成就，尤其是古生代地层。三叠纪以后，除西藏、新疆有海相地层发育外，全国大部分地区均以陆相地层为主，缺乏争取全球层型剖面的先天条件。云南晋宁梅树村剖面（前寒武系-寒武系界线）、吉林浑江大阳岔剖面（寒武-奥陶系界线）、湖北宜昌王家湾剖面（奥陶-志留系界线），贵州长顺睦化和大坡上剖面（泥盆-石炭系界线）均列为具有竞争力的候选剖面。广西桂林南边村剖面已定为全球泥盆-石炭系界线副层型剖面。1997年1月，国际地科联通过浙江常山黄坭塘剖面为奥陶系达瑞威尔阶（Dariwillian）的全球层型剖面，这是我国第一个被确立的金钉子剖面。浙江长兴煤山剖面作为全球二叠-三叠系界线的全球层型剖面，其前景十分看好，二叠纪末的长兴阶早在80年代和乐平统在90年代已成为国际间公认的阶和统。我国学者金玉玕作为二叠纪地层分会主席所提供的二叠纪三分方案：下二叠称乌拉尔统（Cisuralian），以俄罗斯乌拉尔剖面作为标准；中二叠称瓜德洛普统（Guadalupian），以美国西南部剖面作为标准；上二叠称乐平统，以中国华南剖面作为标准的建议已得到国际同行广泛的赞同。

第30届国际地质大会对末元古界、奥陶系、二叠-三叠系界线进行了学术讨论，并认为全球性末元古界的划分对比显得更为迫切。

4.1.6　层序地层学

层序地层学是80年代以来迅速发展的学科之一，并在油气勘探中发挥了很大的作用。

70年代地震地层学的出现首先引用了 L. L. Sloss 层序的概念，随着研究的深入、反射地震技术的提高以及地震成果与露头钻井资料的结合，逐渐形成了层序地层学的完整的概念和方法体系。将层序理解为一种等时地层单位，即由一套相对整合及成因上有联系的地层组成，其顶和底以不整合或与这些不整合可以对比的整合为界，强调具等时性的物理界面和层序内的地层有成因联系，因此它也具有成因地层学意义。层序地层学方法可以建立不同尺度的地层对比格架，并将相和沉积体系放在统一的等时地层格架中进行研究，因而在含油气盆地中可以阐明生油层、储集层和盖层的分布规律。对层序的级别划分，一般分为5级，即巨层序（megasequence）、超层序（supersequence）、层序（sequence）、沉积体系域（deposional system tract）和副层序（parasequence）。王鸿祯等强调某些层序级别与已知的宇宙旋回地球轨道变化等因素的联系。在层序成因上，P. R. Vail 等（1977）许多学者都强调全球海平面对层序形成的影响，一个三级层序内部可识别出低位体系域和高位体系域，即反映了一个海平面变化的周期。但另一方面，构造对层序形成的影响也提到相当重要的位置。现已识别出许多构造层序。R. A. Laws 等还提出了区分层序形成是受构造活动还是受全球海平面变化控制的方法，即作出局部的或给定盆地的海岸上超曲线，然后与 B. V. Haq 全球海平面变化曲线（1988）进行对比，有差异的位置即说明是受构造运动影响造成的。但使用这种方法的前提是，B. V. Haq 全球海平面变化曲线是正确的。层序地层学的最大实用性是地层时空构架的形成，它提高了预测地层年代、体系域和相带分布能力，同样也提高了对矿产，尤其是油气有利区带的预测能力。随着研究的深入，层序地层已从中、新生代推向古生代甚至于元古宙，从海相扩大到非海相层序地层。Brown 等认为从50年代相模式到90年代高分辨层序地层学，地层学研究经历了半个世纪的努力，是自 Lyell 以来在沉积-地层领域中取得的最引人注目的贡献。

4.1.7 高精度高分辨率的地层划分和对比

随着地球科学的发展，单纯依据古生物进行地层划分和对比已不能满足当今的需要，应该使用综合的方法和新的技术方法来进行高精度高分辨率地层划分和对比。但生物地层学的传统方法绝对不能忽视，它毕竟是最实用和最简便并行之有效的方法；并且通过补充微体超微化石的资料可以增加其精度。另外，古地磁方法、稳定同位素、米兰科维奇旋回划分、其他物理化学方法以及岩石综合运用，也能提高地层划分对比的精度。高分辨率地层学特别注意具有级序结构和谱系关联的沉积节律，即旋回层（或韵律层）、事件层和具有重要时间标志的超薄层组合，其中最具潜力的是米兰科维奇旋回和 ENSO 事件沉积，ENSO 是厄尔尼诺（El Nino）和南方涛动（south oscillation）通用的缩写代号，厄尔尼诺是指发生在东太平洋赤道附近，表层海温的一种异常增暖现象和过程；南方涛动是指南太平洋高压与印度尼西亚-澳大利亚低压之间的一种“跷跷板”现象。这种事件的出现可引起全球变化，同时在过去地史时期的沉积记录中也有反映。事件层特别注意短期突发性的地质现象，如火山作用、外星撞击陨积层、气候突变、海洋缺氧、震积岩、风暴岩等。在事件对比上，目前应用最有效的是火山灰及其变化物如高岭石泥岩夹矸、膨润土等。古地磁、同位素、微量元素的变化均可为精确地层对比提供帮助。同时我们亦应在年代测定方法和技术上不断改进，在精确地质年代测定、高精度事件地层学、磁性地层学、旋回地层学和层序地层学的基础上，至少建立小于1 Ma 的高分辨率的年代框架。

4.1.8 展望

今后古生物学的大量工作还是化石系统描述及其在地质学上的应用。系统描述和正确分类是我们长期不懈的艰巨任务，这是古生物学赖以发展的最基础的材料。另一方面，古生物学从生物角度进行研究和加强综合性研究也是发展的必然趋势。将化石作为古代活着的生物，引进当代生物学的理论、概念和方法，对化石进行形态描述的同时，加强生物学的研究，包括解剖学、形态功能、系统发育、生物习性、生活方式、运动方式和生物化学等，必然会大大促进古生物学的发展和理论的提高。同时，它的发展对其他学科的发展也会产生一定影响。我国古生物学界最近的三大热点，即澄江动物群、热河生物群鸟类化石和河南红层恐龙蛋化石，需继续加快挖掘和深入研究。著名的化石库将备受关注。前寒武纪古生物学日益受到重视和加强。古生态学从个体和种群生态研究转向群落和系统更高层次的古生态学研究，最终将能阐明地史时期生命系统与水圈、大气圈和岩石圈之间的能量和物质交换关系及演替形式。而一些与古生物有关的自然科学之谜的探索，如生命起源和进化、恐龙的绝灭、人类的起源仍是古生物学的前沿领域。

地层学的重大任务之一是在国际同仁的共同努力和合作下，建立高精度的（至少小于 1 Ma 级）地质年表，使各时代有精确的年龄数据。在1996年第30届国际地质大会期间，F. Gradstein 等曾专门讨论了显生宙年表中年代数值的精确度问题，他们强调放射性测年方法精度高于生物地层方法，前者分析不准确度约为 0.1～0.5 Ma，而划分最细的生物带时限不小于 0.5～1.0 Ma。在放射性测年方法中，提倡^{40}Ar-^{39}Ar 法和 U-Pb 法的综合应用。新生代有^{40}Ar-^{39}Ar 法控制的生物地层和磁性期的对比，故其精度和可信度最高；中生代次之；古生代更是有较大的不准确度。由于不可能所有地层均有合适的同位素年龄测定对象，因此化石带和可靠年龄之间的对应关系是至关重要的。今后发展的方向是站在全球的角度来考虑问题和综合化、精确化及定量化。计算机数据处理以及各种作用和结果的模拟也是发展的必然趋势。

4.2 矿物学

矿物学是地球科学最基础的学科之一。今天，矿物学已进入到以近代物理、化学理论为基础，采用各种现代先进方法和技术，将研究对象由宏观世界转入到微观甚至超微观世界的时代。同时矿物学的深入研究也为各种技术与国民经济建设所需的新型材料开辟了广阔的前景，它与其他地球科学密切结合为寻找和开发矿产资源提供了有用信息，与此同时也推动了本学科的迅速发展。以下简述近年来矿物学研究的现状和重要进展❶。

4.2.1 矿物物理学

矿物物理学应用固体物理学、量子化学的理论和近代物理化学技术研究矿物，探讨矿物结构、矿物物理、矿物化学和矿物成因中的本质问题。其中以矿物谱学的研究比较成熟，它研究矿物在电磁波辐射情况下所出现的吸收和发射现象。在电磁波辐射下，矿物内部的离子（或原子）中的电子（或核）的状态发生变化，对电磁波产生吸收、反射或再反射，从而可以得知矿物中离子的电子能级，进而推知离子的价态、配位、局域对称、有序无序和

---

❶ 黄蕴慧.1998.矿物学研究现状与发展设想.中国地质科学院：地质科学技术研究现状与发展趋势.26～33.

键性等许多信息。矿物谱学主要包括矿物的红外光谱、拉曼光谱、穆斯堡尔谱、X 射线光谱、吸收光谱、反射光谱、发光光谱、顺磁共振和核磁共振等。近年来采用了魔角旋转和交叉极化等新技术，使核磁共振谱的性能获得极大的改进，可以对许多种原子核进行探测。这样对大量造岩矿物，特别是碳酸盐矿物的谱学研究有相当大的意义，核磁共振也可用于硅酸盐和铝硅酸盐玻璃的研究。与同步加速器有关的谱仪的使用也是矿物谱学的一大技术进展，它作为重要的辐射源，以外延 X 射线精细结构和 X 射线吸收近边结构谱来研究矿物和玻璃。在第 30 届国际地质大会矿物物理学学科讨论会中，论文亦以谱学研究居多，使用方法有红外光谱、魔角旋转核磁共振波谱、电子顺磁共振波谱、X 射线光电子能谱及以同步辐射为光源的 X 射线吸收谱等，研究的问题包括矿物结构、缺陷和色心、元素的价态及谱的分析方法的改进等。

80 年代在矿物物理学上的重要进展是化学键理论的引入。它主要包括晶体场理论、分子轨道理论、能带理论等，如利用晶体场理论，可以定量地处理吸收光谱结果，解释 Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Cu、Ni 等含铁族、稀土族和钠属离子在矿物中择位、有序及热力学的分配等；应用分子轨道理论可以研究硅酸盐及大量含氧基团、较简单的硫化物和氧化物等；应用能带理论可以解释矿物的反射光谱和电学性质等。总之，化学键理论可探讨晶体配位、矿物几何构型及其存在的温压范围，计算力常度和聚合度，以及在计算机帮助下确定矿物组分、形成矿物各种结构的能量，从而得出不同温压状态下具有最低能量的矿物相，或者最可能出现的稳定矿物相。

在矿物能量状态方面，对离子晶体，求出其能量包括带电离子间长程作用力和近邻离子的短程作用力；对非离子晶体，80 年代发展了晶格动力学的方法，对 30 多种矿物的计算取得了较好的效果。近年来准晶态的发现，不但列有新的准晶态结构模型，还对准晶态矿物能量状态方面提出了新的研究课题。

在矿物晶体结构方面需引起注意的是，天然矿物晶体结构往往偏离理想矿物结构，这种偏离将会提供矿物形成及形成之后所经历的许多信息。天然矿物晶体常常存在缺陷，如空位、杂质、位错、层错界面等。透射电镜、扫描电镜和近年来隧道显微镜的使用，打开了 1μm 以下矿物显微领域，使人们能够进一步认识矿物的复杂世界。

4.2.2 成因矿物学

成因矿物学是研究矿物成因及其应用的科学。不论岩体或矿体，都是各种矿物的集合体。因此，岩石成因与矿床成因问题都离不开矿物成因。成因矿物学在矿产勘查与找矿工作上的重要作用是不言而喻的，它提供了找矿方向和找矿标志；另外，它也为制备人工矿物原料提供依据。近年来，成因矿物学得到很大发展，在生命科学、深部地质、矿产和石油勘查、矿物材料、宝玉石开发等领域得到广泛应用，并且其应用范围还在不断扩大。在第 30 届国际地质大会上，该学科讨论会的重大成果反映在两个方面：一是成因矿物学在生命科学方面的应用，特别是在人体科学方面的应用，如“成因矿物学与生命的起源——生物结晶的概念”，“肾结石的矿物学研究”和“巴西南部白垩系砂岩中化石骨骼的交代产物含钙锶磷钡铝石”等重要报告；二是在我国展开的大区域矿物学填图以及在金矿找矿方面所起的突出作用。近年来，新的矿物成因标型特征不断发现，促进了找矿工作，在宝玉石开发方面已有不少成功的先例，俄罗斯曾提出了在金刚石标型特征的启示下进行新的原生金刚石矿床预测。成因矿物学还可应用于地层学研究，并提出了矿物地层学概念，例如我

国利用角闪石族矿物的演化来反映含铁建造的演化，追索地层层序，进一步指示矿床的规模。俄罗斯应用于乌拉尔前寒武系剖面的研究，认为该时期生物化石缺乏，矿物尤其是副矿物便成为前寒武纪地层原始成因最可靠的信息源。

最近人们已注意到矿物表面的研究。90年代已经可以利用现代科学技术，得出矿物表面化学成分、表面显微形态和原子在表面上“几何”排列等方面的信息。这些成果可广泛使用在元素地球化学循环、成矿过程中元素的富集、元素分散与环境污染、矿石加工和提取、催化剂和吸附剂的使用及建筑材料矿物风化情况等方面。我国利用扫描隧道显微镜已对石墨、碳纤维、硫化物和硫盐等作过矿物结构的研究，并获得了达到原子级分辨率的辉钼矿、辉银矿、方铅矿等矿物图像。加拿大利用钻式电子光谱研究了 Helmo 金矿的变质围岩和矿石中的石英、白云母、微斜长石、黄铁矿和重晶石颗粒表面成分，发现含硫、钾的氯化薄膜，论证了高盐度流体对矿化的参与作用。由此可以看出，矿物表面的研究不但有其理论意义，而且在应用上也有十分广阔的前景。

4.2.3 应用矿物学

应用矿物学研究矿物的物理化学性质、工艺性质及其应用——建立矿床普查和评价的矿物学准则，建立矿物原料富集和加工的合理工艺流程。近年来，应用矿物学随着形势的发展增添了不少新内容，主要表现在4个方面：①新型矿物原料和矿物材料。将那些尚无用途的天然化合物转变为国民经济中的珍贵矿物原料，将那些不具实用意义的矿物转变为工业矿物。通过对矿物微观世界及其特异性能的研究，可为人类开辟新型矿产资源。如宝石，以前未当作宝石的矿物，如能形成颜色美丽、晶体透明、折光率高、硬度较大、有特殊光学效应的某些矿物，就可以进入新宝石行列。常见的黝帘石—绿帘石矿物，60年代在坦桑尼亚发现了它的天蓝色透明晶体，因而成了高级宝石原料，并称之为坦桑石。矿物的半导体性质、压电性质、激光性质、离子交换性质等研究，使许多矿物在现代工农业和国防上得到广泛的应用。在矿物材料上，非金属矿物更是大有可为，它可以满足多方面的要求，其中包括建筑材料、化工材料、冶金材料、机械工业材料、石油钻探材料、轻工材料、电子工业材料等。值得一提的是，我国耐火材料和稀土材料有明显优势，应发展稀土超导材料、稀土磁性材料、稀土荧光材料和稀土激光材料等多种系列产品。②在工艺矿物学上，要建立矿物原料最合理的加工流程，就必须研究矿石的物质成分、工艺性质、在工艺流程中的性质及其与工艺流程有关的问题，以便使矿物原料得到综合利用。近年来，在选冶工艺上，如铁矿、磷矿、铬矿和多金属的各种选矿工艺，难选贵金属的选矿和回收，金矿氰化前采用的快速氧化烧结工艺和浮选前预富集工艺都取得了良好的成果。最近在宝玉石变色工艺上更有飞速的进展。③在环境应用上，研究矿物尘埃对人体健康和动物的危害及其预防方法也是目前矿物学研究的重点。其它像我国对中医药矿物学研究和印度关于硅藻土在太阳能方面的应用研究亦颇有新意。④研究纳米矿物的崛起。矿物的颗粒如果达到纳米级大小，其化学反应、物理性能、工艺性质均有极大的变化，纳米颗粒可以在磁、电、光热和化学反应等方面显示出特异性能，因此具有广阔的应用前景，尤其是在纳米材料科学上。

4.2.4 矿物包裹体

近年来，在包裹体研究中，岩浆岩熔融包裹体研究是当前国内外学者最为重视的前缘性课题。运用岩石中熔融包裹体及熔融-流体包裹体研究结果可以解释成岩作用、构造运动、

岩浆活动、变质作用及深部地幔物质活动过程中的许多地质问题。我国在变质带流体包裹体研究上成绩比较突出，如通过对大别山变质带中榴辉岩熔融包裹体、流体包裹体（榴辉岩中所发现的包裹体为国内外首次发现）的研究，确定了该高压超高压变质带变质作用的 p-T 演化轨迹属等温减压作用，测得均一温度为 820～950℃，捕获压力为 2.05GPa，并论证其成因与上地幔有密切的关系。矿床中流体包裹体的研究是经常性的和大量的，这在稀土-Fe-Nb 矿床、W-Sn 矿床、金矿床、金属伟晶岩方面我国已取得了重大成果。近年来也已开始对地幔岩中的流体包裹体进行研究。通过对各种超基性岩和复合捕虏体内包裹体的研究，为包裹体的性质和特征、地幔物质成分及不均一性、地幔交代作用等方面提供了重要实验依据。在分析技术方面，像电子显微镜、激光、拉曼光谱等已得到广泛使用，近来，南非对液相包裹体成矿溶液微量分析技术有所创新。在精细的变质矿物学方面，许多学者对重要的变质矿物，如石榴子石，变质的白云母、辉石、橄榄石等作了详细的研究和总结，对不少变质矿物作出了一些重要的实验数据。近年来还出现了纳管电泳方法或称毛细管离子分析法（CIA），该方法具有成本低、分析速度快、用量少（0.5 g）、灵敏度高（达 5×10^{-9}）的特点，可分析 K、Na、Fe、Co、N、Cl^-、SO_4^- 和 HCO_3^- 等 20 余种项目，具有广阔的应用前景。

4.2.5 矿物温度计和矿物压力计

矿物温度计和矿物压力计虽是一门年轻的分支学科，但近年来发展很快，研究方法日臻成熟，实验数据日趋准确。当代矿物温度计和压力计的研究已从理论和实验室的研究发展到与解决地质实际问题密切结合的阶段。其研究内容已从随着温度、压力和介质条件的变化而引起的矿物微细结构与成分的变化以及矿物间的离子交换，发展到变质岩的岩石组合和变质相变系列；从下部地壳和上地幔的组成和性质，发展到大洋壳和大陆造山带的形成和演化的动力学过程以及天体碰撞和陨石中的冲击变质矿物。矿物温度计和矿物压力计将成为研究地球和岩石圈的形成、演化以及大陆动力学的重要手段和分支学科。

许多学者都已认识到，矿物温度计和矿物压力计的各种计算方法都具有一定的限制条件和应用范围。某些变质矿物的成分和组合可受岩石全岩化学成分和介质条件（如流体的成分和浓度）的影响，因为矿物间的离子交换（分配系数）与流体存在着密切的关系。近来对硅、碳和氧化物单矿物的成分、结构状态以及矿物间离子交换与体积扩散建立的矿物温度计和压力计作了不少创新和修改。石榴子石随着温度、压力变化形成的成分环带的研究，以及在二元、三元和四元系统中与共存矿物相之间的离子交换方面的研究，促使与石榴子石有关的矿物温度计和压力计有了新的发展，并且正在与矿物冷却速率的研究相结合。

矿物温度计和压力计无论在理论上还是在实际应用上，如长石在不同条件下的无序变化、白云母 XRD 峰值对于地质压力的作用、硬柱石在变质温压条件变化下的稳定范围等方面的研究都取得了一定的进展。此外，在对我国某些陨石中动态高压矿物的研究中，发现和证实了陨石在碰撞引起的冲击变质中产生的非平衡多相矿物组合微细结构，其粗粒组合有 γ 相尖晶橄榄石＋低钙镁铁榴石，细粒基质组合有镁铁—镁铝榴石固溶体＋镁方铁矿，其矿物形成于 20～24 GPa，2000～2300℃条件下。已有学者将注意力放在寻找地球上高压变质带中是否存在相当于冲击变质作用下形成的动态高压变质矿物上。

4.2.6 展望

矿物学发展的主要方向是：①继续吸纳当代自然科学中的新理论、新技术、新方法，以便对矿物的各种物理化学性质作更深入和全面的了解；当前，特别要重视矿物表面、界面和集合体的特征，打开矿物的显微和超显微世界，力求真正掌握矿物的本质；②与其他地质学科相结合，如岩石学、矿床学、地球化学、动力学等，深层次地探讨地球科学重大问题，更好地为找矿服务；③扩大研究范围，如材料、环境、医药等方面；例如，矿物学与材料学相结合的方面，在对天然矿物的物理化学性质研究的基础上，经过选矿、加工、人工合成或晶体培养，研制出的工农业和科技发展所需的各种材料，应用前景十分广阔；虽然与环境和医药相结合的研究只是刚刚起步，但潜力不可忽视；④实验数据的自动化。实现矿物形成过程以及矿物晶体结构的理论模拟与实验模拟的计算机系统化（数据库）。

4.3 沉积学

沉积岩占有地壳表面岩石的最大面积，长期以来一直受到广泛的重视与关注。沉积学是探索岩石圈演化、过去全球变化，解决矿产和能源问题的关键基础学科之一。沉积物记录了地球表面的地质演化历史，反映了岩石圈变化方式和过程。90年代沉积学的研究主要集中在①沉积相和沉积环境；②沉积层序和沉积旋回；③成岩作用和④盆地分析等方面。

4.3.1 沉积相和沉积环境

沉积相和沉积环境是沉积学最基本的研究内容。沉积相以往的工作偏重于相的分析和相模式的建立，当前更趋向于对某些特殊相和沉积物，如碳酸盐岩、生物礁、大陆边缘沉积、黑色页岩、湖泊沉积等，以及建立全球性沉积相对比的研究。在沉积环境方面，内容更为广泛，既有古代和现代的海洋环境，也有古代和现代的陆相沉积环境。

1）碳酸盐岩及生物礁

碳酸盐岩研究的深入是当代沉积岩研究中的重大转折之一，主要表现在①对碳酸盐成分、组构、构造、成因等方面的研究取得了与以往的简单认识大不相同的新看法；②在碳酸盐的微相分析、碳酸盐台地的分类、高分辨率的碳酸盐地层、碳酸盐的成岩作用等方面的研究上也取得了重大进展。值得指出的是，世界原油的产量大约50%产于碳酸盐岩中，因此它在油气勘查方面具有十分重要的意义。

生物礁是一种特殊的由生物或生物作用形成的碳酸盐沉积。目前，关于生物礁的研究主要是以沉积学和古生物学相结合的方法来揭示礁的分布发育规律，并在生产上指导油气勘探工作。礁灰岩的油气储量远远高于其他沉积类型。现代生物礁还可以保护人类居住的海岸环境，抵抗风暴袭击。生活在生物礁区的鱼类，可高出海洋平均数的100倍，并且可以直接为人类提供观赏鱼类和海洋食品。生物礁也是指示环境的定量标志之一，如气候、海水的温度和透明度等。因此，关于生物礁的研究不仅在油气勘查工作上，而且在保护环境和生态上，都具有重要的意义。

微生物的沉积作用和形成环境的研究也是当前的热点。90年代已从碳酸盐扩大到磷块岩和现代锰质结核，表明微生物沉积作用的研究已与资源的形成和开发相结合，具有良好的前景。

2）大陆边缘沉积

大陆边缘包括被动大陆边缘、活动大陆边缘和岛弧及弧后盆地等。关于大陆边缘的沉积研究，既包括沉积物类型和不同沉积物的对比，也涉及到所有能控制沉积作用的各种因素的研究。目前研究的趋势是，①大陆边缘的沉积研究不只是涉及沉积学，更重要的是全球对比，因为沉积物的全球对比可揭示全球性环境变化事件；②该项研究还涉及构造、海平面变化、层序地层学等研究领域。尽管从全球角度来说，大陆边缘沉积和边缘盆地的研究是比较成熟的，但我国古老地史时期以陆相盆地及内陆陆表海沉积为主的盆地不能套用边缘海盆地的模式，应该结合我国的实际情况，总结出这类板内盆地的模式。

3）沉积环境

在古代海相沉积环境中，仍以大量的浅海相沉积的研究为主，但近来也有不少涉及深水沉积的内容，如在等深积岩、浊积岩方面也有长足的进步。由于对环境大气候研究的需要，对现代沉积环境的研究日益深入，进展迅速。一方面从成分结构、物源变化等方面来探讨环境变化；另一方面加强了实验沉积学的研究，如通过水槽试验，对沙的搬运及层理的形成有了更深的了解。日本沉积学界在这方面研究已显示出特色。他们在循环水槽中通过对细砂与高密度悬浮物的流体进行试验，以求得对似丘状层理形成机理的认识。此外，为了了解海岸波浪带颗粒分选和搬运机制情况，他们也进行了大尺度的水槽试验，以检查在海滩循环过程中颗粒的分选特征、分选作用与波痕、水流、形态和涡流之间的关系，以及分选纹层的厚度、不同颗粒下的跨越整个滨海带的搬运速率等。日本研究了千岛群岛一带海平面以下 40～100 m 深度的海底大陆架环境，通过对海台和火山岛上沉积物的粒度、成分和火山岩性质的研究，阐述第四纪以来古气候变化、海平面升降的构造运动，计算出大陆架的上升速率为 0.1～0.2 mm/a。

现代沉积的研究应更注重与环境的关系。对现代沉积，如沙漠、三角洲等沉积物的研究应探讨物源区分布、气候、环境变化的成因联系。目前，许多学者都是通过现代沉积物的研究来再造当时的气候和环境变化，同时从沉积物的组分和韵律性来论证近代的地质构造活动的。

4.3.2 沉积层序和沉积旋回

关于沉积层序，在层序地层学部分中已经讨论过，在此不再重复。沉积旋回，即具有周期性和韵律性的旋回，是沉积岩最显著的特征之一，它在盆地发育的不同阶段的沉积剖面中表现为相带或相序的周期性变化。P. R. Vail（1987）认为，海平面变化、构造沉降、沉积物供应、气候条件是控制地层和沉积旋回发育的 4 个相互独立的基本控制因素，并特别强调全球性海平面变化因素。近来，不少学者则更强调构造作用的重要性。因此，在今后的工作中区分出构造作用和海平面变化对沉积旋回的影响是一个重要的研究方向。

关于沉积旋回的研究最明显的进展莫过于 P. R. Vail 等（1977）和 B. V. Haq 等（1987，1988）应用地震地层学和层序地层学的概念和方法，综合世界各地中、新生代有关地层、古地磁、古生物等大量数据而绘制出的两轮全球沉积旋回图表。目前研究领域已逐渐扩展到难度较大的前寒武纪地层旋回性的研究和碳酸盐岩沉积旋回研究。俄罗斯在前寒武纪研究方面作过多次尝试，提出了主要根据沉积旋回划分地球地质历史周期的新目标。

沉积旋回的研究无疑有助于了解古气候变化、海平面升降和古环境情况，沉积小旋回的主要控制因素是米兰科维奇旋回。它多与地球和天体轨道周期变化有关。而大的和巨型的沉积旋回可能与大陆地壳开裂引起的升降、大洋中脊的扩张体系有关。沉积旋回结合层

序地层、事件地层资料，并利用微体化石、同位素、稀有和微量元素、地球化学和古地磁等传统方法，可进行高分辨率地层划分和对比。如果想要使划分精度达到米和厘米级，则非借助于沉积旋回的途径和方法不可。由上述可知，我们仍需对沉积旋回进行深入的研究。

4.3.3 成岩作用

成岩作用的研究在沉积学中之所以能得到特殊的关注是因为成岩作用不仅影响岩石的成分、结构和构造，而且还影响岩石的储集和运移物质的性能，从而直接影响石油、天然气和许多层控矿床的形成。

70 年代对碎屑岩成岩作用研究较多，并有较深刻的认识；它主要强调近地表早期成岩作用对岩石储集性的控制作用。近 20 年来，重点转向碳酸盐成岩作用和埋藏成岩作用的研究。借助于可使碳酸盐结构分析和地球化学取样的空间分辨率得到提高的新技术，可以对碳酸盐胶结结构和骸晶成分内稳定同位素、化学、矿物和孔隙度的变化进行深入的研究，从而揭示晶体生长的复杂性、矿物-溶液反应以及海相至淡水碳酸盐成岩系统中孔隙度的发育程度。成岩作用与地质年代学相结合，有助于了解海平面和气候变化的时间尺度及其相互关系。古代海相石灰岩还可提供古海洋化学成分的信息。此外，我们还要注意成岩作用在改变原始结构和成分方面产生的效应，这对进一步探索海洋化学成分的长期变化以及相关的古气候古构造至关重要。近来，越来越多的证据表明，微生物与成岩作用也有重要的联系，关于其在碳酸盐生成和破坏中所起的具体作用方面的研究将会取得很好的成果。碳酸盐岩埋藏成岩作用对次生孔隙的作用和影响已为人工模拟实验所证实。据报道，在中东、北非、东南亚及北美中生代及第三纪石灰岩中，微孔隙（5～10 μm）发育，常形成微孔储集层；而许多微孔隙正是在埋藏环境中形成的。在我国塔里木盆地北部下奥陶统油气田中，亦发现形成于埋藏环境下的微孔储集层。总之，埋藏环境下能形成有意义的次生孔隙，它为碳酸盐岩地区深部油气勘查开拓了前景。

近年来，关于白云岩化问题的研究已经证实，只要构成白云石组分的离子达到饱和，不需要特别的水，白云石就可以在任何盐度的水中形成。以往认为交代白云岩的形成需要充足的镁离子来源，因而仅能在近地形成。80 年代以来有不少学者研究证实，这类白云岩可在地下埋藏成岩过程中形成。

成岩作用显然受到构造、沉积相、盆地类型、地下水流动型式等综合因素的控制，因此查明它们之间的相互关系，建立不同的成岩模式和成岩作用地球化学-水文学模式是今后工作的努力方向。

4.3.4 盆地分析

沉积盆地是煤、油、气等能源矿产，许多层控的沉积矿产以及水资源聚集的场所，是岩石圈的重要构造单元。盆地分析作为沉积学的一个分支始于 60 年代初，它以盆地为整体，以研究其沉积充填和重建古地理为主要内容。由于人们对能源的特殊关注，从 70 年代板块构造学说引起的地学革命以来，通过运用多学科的理论和方法研究盆地，形成了较完整的体系。当前，盆地分析研究已成为探索岩石圈演化及寻找能源和固体矿产资源的重要手段之一。将盆地形成和演化放置在全球动力学背景下研究，应用多学科和定量化研究方法和手段，揭示出盆地形成演化的动力学过程及其与岩石圈和地幔深部过程的关系，已成为这一学科当今的主要方向。

从当前研究内容和热点来看，关于盆地分析研究最基本的和大量的工作将是：①以层

序地层、事件地层、生物地层为主要内容进行盆地沉积充填和油气演化的分析；②对不同类型盆地的构造分析。以前，构造分析对裂谷等伸展类盆地研究最多，也最深入。最近对前陆、前弧、陆间和陆内盆地都给予了较多的关注，尤其在前陆盆地领域有显著的进展。近年来应用流变学理论在前陆盆地形成机制上进行了相当细致的工作，前陆盆地演化过程中逆冲加载、挠曲以及板块弯曲应力的粘弹性释放下沉的机制在北美阿巴拉契、科迪勒拉和挪威斯匹次卑尔根等前陆盆地中都得到验证，并有进一步的发展。最近在盆地成因机制上识别出在板块俯冲的短暂间断期前弧盆地中有主动的拉伸作用存在，这对以往把前弧盆地只当作介于活动的火山弧和海沟斜坡增生体之间的被动的地势低的传统认识是一个突破。值得注意的是，沉积盆地的地热史和流体日益受到重视，因为深部热体制不仅是盆地形成演化的重要因素，而且也是油气生成（主要取决于干酪根的埋藏受热情况）的主要控制因素。在研究程度上也已从一维发展到二维或三维地热场的研究。对热来源、热流在空间不均匀传递和分布等均有深入的探讨。在盆地类型上，出现了按热特性划分类型的新动向。在三维模拟方面则集中于流体运动和油气运移。

盆地模拟是现代盆地分析领域中一个重要的组成部分和研究热点。由于计算机技术的应用，大量盆地资料的获取以及盆地分析理论的更新，使盆地模拟研究发展十分迅速。首先在盆地模拟软件系统，一维模拟已较为普及并成功地应用于盆地沉降史、热史和烃的成熟度研究。二维或三维多参数的模拟，在其内容方面有盆地的充填演化和沉积层序模拟、构造作用和沉降机制模拟、热体制、有机质热演化模拟、油气产生运移和储集过程模拟、储层不均一性模拟等；它的发展趋势是动态化和实用化。但三维模拟还处于探索阶段。盆地模拟研究与石油天然气工业的密切结合已成为一项比较成熟的实用技术，目前盆地模拟系统已覆盖了伴随盆地形成演化的几乎所有物理和化学过程。由于油气运移模拟技术是以往的难点和空白，所以当今已成为盆地模拟研究的聚焦点。最近在油气运移过程中的相态、运移路径和主干道方面也取得了进展。

盆地模拟是盆地参数的定量化、盆地各种地质过程的再现和动态仿真。它不仅仅是用来解释已发现的事实，更重要的是在于预测，更有效地解决未知的勘查问题。盆地模拟已经成为资源预测和评价以及勘查开发中不可缺少的重要的研究内容和技术手段，相信今后仍将有巨大的发展潜力和应用前景。

4.3.5 展望

随着人们对各类资源和环境的可持续发展的需要，沉积学的发展前途是非常光明的。我们一方面要加强传统沉积学的研究，如沉积物、相分析、沉积作用和过程研究等，这是基础，绝不可偏废；同时还要采用新理论、新技术、新方法深化对沉积学的研究。另一方面要扩大应用领域，使人们了解沉积学在解决资源、环境、灾害、人类生存和社会发展中所能发挥的重大作用。在资源方面，要继续发挥其在各类沉积矿产，特别是煤和油气勘查、开采中的指导作用；在预测有毒污染物的运移及其对水资源的影响，确定自然灾害的影响以及土地利用等方面也要充分发挥其独特的作用。这样它既解决了实际应用问题，同时也推动了沉积学学科的发展。

4.4 火成岩岩石学

火成岩岩石学是地球科学的重要支柱。70年代中期至80年代，火成岩，特别是花岗岩的研究曾掀起热潮。最引人注目的是，按照物质来源划分花岗岩的成因类型，即I型、S型、A型和M型。并将单一岩石学研究发展为与地球化学、同位素地质学、板块构造等研究密切结合。近年来，单纯的花岗岩成因分类问题已明显地不是研究的主流，这在第30届国际地质大会学术讨论会上亦可以看出。当前，更受注意的是岩石学与岩石圈和地球动力学的联系与多学科的综合研究，火成岩已成为探索岩石圈的组成、结构和演化的一个重要窗口。下面将火成岩岩石学的研究现状和展望作一简单介绍。

4.4.1 岩浆的化学和物理作用

探讨岩浆从地球内部生成母熔融体时起到它完全结晶时止的全部过程，一直是火成岩岩石学研究的重要目标。在第30届国际地质大会上，垂向岩浆系统研究是热点之一。例如，根据日本火山的岩浆柱系统提出地壳中可能存在4个深度上的岩浆房，岩浆房越浅岩浆喷发越早。又如，对岩浆房研究发现，岩浆房底部到顶部，不同造岩矿物中各种元素的含量是变化的。在岩体侵位机制研究上采用了多种方法，如采用了磁化率各向异性（anisotropy of magnetic susceptibility）、显微构造分析、流动和塑性变形的运动学分析，研究了与花岗岩体定位有关的流动作用和岩体定位、流动及固态变形的相对时间。将野外资料与热、能量和动量守恒关系理论分析及分形粘指实验相结合（fractal viscid finger experiment），得出了关于隐爆作用的控制因素的新认识。采用多种构造分析方法对岩体定位机制进行分类，提出了定量判别主动伸展、构造伸展和同化混染定位机制的方法。

分析岩浆作用过程的一个重要进展是1995年MELTS模型的引入。该模型建立在矿物和硅酸盐熔融体热力学特性基础之上，可以计算出液相线温度、矿物结晶温度以及矿物和熔融体的成分；可以提供随温度压力条件变化而变化的有关残存熔融体质量、密度和成分方面的定量信息；也可以预测矿物的结晶顺序及其组成，被结晶的整个固体物质的质量和密度。

在火成岩地球化学方面，岩石主量元素、微量元素分析和各种同位素测定（$^{144}Nd/^{143}Nd$、$^{87}Sr/^{86}Sr$、$^{207}Pb/^{204}Pb$、$^{18}O/^{14}O$、$^{3}He/^{4}He$、^{10}B）朝着微量区、高精度和高效率方向发展，并利用岩石及其深源包体地球化学数据与同位素测定结合，对火成岩的岩浆来源、源区地幔物质组成、地幔岩石部分熔融程度、岩浆房内分离结晶作用程度、岩浆形成后的混合作用的类型和混合程度进行研究。在此基础上进一步探讨大陆地壳的生长、中下地壳的组成、四维岩石圈地幔的组成和结构等更深层次的问题。

在重视岩浆化学作用的同时，对其物理作用的认识，诸如岩浆的密度、粘度、结构以及流体动力学与塑性流变学等方面的认识也获得了较大的进展。如：①认识到岩浆密度对岩浆上升的约束；②在岩浆的结构单元上发现了Al的优先分布的结构单元，提出了一个基于化学组成对自然界岩浆结构的计算模型；③认识到大多数花岗岩侵入体在其岩浆上升定位过程中通常不是牛顿流体，而是接近于塑性流体，故其动力学机制需用流变学理论来探讨。

在岩浆岩的热机制方面，近年来较集中于讨论花岗岩、熔融作用与混合岩之间的关系。

关于熔体分凝的概念近年来有很大变化，认识到分凝是受熔融反应的类型（富水熔融和缺水熔融）、熔融速率、熔融深度及变形速率一系列因素控制的；并认为热源主要可归结为两类：①地壳增厚后在剥蚀情况下的热松弛以增加地壳内部产生的热，同时由于后来的伸展作用和部分岩石圈的拆沉作用（delamination）通过 Moho 增加热流；②由于较热的软流圈地幔上拱或是因为地幔物质大规模的侧向运动而产生热平流，通过玄武岩浆的底垫作用（underplating）带到地壳。此外，还认为花岗岩类岩石的多样性可能同分离结晶和岩浆混合有关。

4.4.2 岩浆-成矿-构造作用

70～80 年代，确定板块构造环境的火成岩化学元素判别图曾获得广泛的应用。随着研究的深入，现已认识到，单纯地依靠这一方法可能会造成构造环境的错误判断。近年来，已认识到火成岩化学特征依赖于源岩性质、局部熔融条件和岩浆演化机理，因此必须把元素判别图解与地质学、岩石学研究结合起来，只有这样，才能较正确地判断其形成的构造环境。

关于花岗岩岩浆活动与构造环境关系的研究一直是火成岩研究的热点。很多学者分析了不同构造环境（同造山、晚造山、后造山和非造山）下花岗岩类岩石组合的特点，现已认识到，花岗岩成分主要受岩石圈板块组成的性质、壳幔相互作用的程度和特点以及地球动力学背景的制约。

近年来，板块内部及板块边缘的火成岩和岩浆作用备受关注。在板块内部，在挤压环境下的扩张阶段和拉张环境，可以形成一系列大陆板内独特的火山岩组合，包括以富钾流纹岩、英安质火山岩为主，夹碱性玄武岩组合；以碱性玄武岩和玄武安山岩为主；夹粗面岩或碱性流纹岩的双峰式火山岩组合；钠质或钾质的碱性玄武岩和拉斑玄武岩组合；以及金伯利岩、碳酸岩和碱性超基性岩的各种共生组合。有一些岩石类型如科马提岩、奥长环斑花岗岩（Rapakivi granite）、金伯利岩、钾镁煌斑岩、碳酸岩、镁玄武岩等，因为具有特定的地质意义或找矿价值而备受重视。奥长环斑花岗岩是板内花岗岩，构造环境与全球性拉张事件有关，受裂谷作用制约，年代几乎全为中元古代。但最近美国在第三系中发现了奥长环斑花岗岩；在我国显生宙也有发现。芬兰 I. Haapala 认为，这类花岗岩往往表现为双峰式，常与辉长岩、苏长岩、斜长岩、辉绿岩共生，其成因与玄武岩浆的底侵作用导致的中、下地壳的部分熔融有关。科马提岩只产生在太古宙，可能是太古宙的高热流引起上地幔部分熔融程度升高而形成的。研究结果表明，板块边缘包括岛弧、活动陆缘和弧后盆地的拉斑系列、钙碱性系列和富钾碱性系列火山岩，自老到新是不同的阶段产物，而且在垂直岛弧的方向上，具有呈带分布的特征。它的成矿带可归纳为三类：一是与裂谷和“热点”有关的碳酸岩铌、铈、磷、锶、钡矿、金刚石矿、块状硫化物矿和某些斑岩铜矿；二是与消减作用有关的岛弧型斑岩铜-金矿、黑矿（铅、锌、铜）、金矿、黄铁矿-自然硫，活动陆缘型斑岩铜-钼矿、钨、锡、萤石矿，弧后型锑、汞和金矿；三是与陆间碰撞有关的斑岩铜矿、黑矿、汞矿、铀矿和金矿。

我国的花岗岩与成矿关系已作过较好的研究，认为同熔型花岗岩属西太平洋成矿带的内带，有关矿产以上地幔中较富的铁、铜、钼为主，其次为金、银、铅、锌、硫等，矿床类型主要有斑岩型、热液叠加型（部分为夕卡岩型）和中低温热液脉型；矿床常受火山构造和中浅成侵入体接触带的控制。改造型花岗岩在西太平洋成矿带的外带，伴生矿产以地

壳中丰度较大的亲花岗岩的元素 W、Sn、Nb、Ta、Be、U 等为主；成矿一般为小岩体，有强烈的蚀变交代作用；蚀变和成矿元素在时间和空间上有明显的分带现象；矿体常产在岩体的顶部和内外接触带，以接触交代型、大脉型和蚀变花岗岩型等热液矿床为主。

岩浆作用的机理与成矿作用关系密切，岩浆分凝作用与火成堆积岩以及其中的岩浆矿床的形成机理已从岩石相平衡的实验与理论分析中获得比较成功的解释。T. N. Irvine 指出，基性层状侵入体中的铬铁矿矿床和铂钇硫化物矿床的形成与超镁质岩浆和斜长岩岩浆之间的混合作用有关。C. W. Burnham 提出的含水长英质岩浆—岩浆期后溶液—成矿作用模型，明确指出成矿作用首先与形成的岩浆的源岩有关，不同的源岩提供不同的金属元素，这是决定一个地区金属成矿潜力的前提条件。但是，要使该潜力变成矿床现实还决定于其他一系列因素，例如侵入体的定位水平、矿化区的物理化学条件、构造控制的作用等。花岗岩浆的氧化还原状态和岩浆分异程度则是决定成矿元素相对比例的首要控制因素，而它们又与源岩的性质有密切的关系。

4.4.3 实验岩石学

实验岩石学的重点是高温高压实验。其在火成岩熔融实验方法上已取得了明显的进展。60 年代后期到 70 年代着重于地幔橄榄岩-榴辉岩以及玄武岩的高压熔融实验；70 年代后期和 80 年代早期更多集中于俯冲带岩浆，特别是安山岩以及高钾岩石、金伯利岩、磷酸岩的成因分类；80 年代后期和 90 年代，通过超高压实验来探讨下地幔和地核的性质。目前，超高压实验技术包括静压的金刚石腔超高压技术、动态的大容积超高压技术和冲击波超高压技术。高压实验的目的主要是研究地球层圈结构、地幔和地核的组成、性质以及热状态。在第 30 届国际地质大会上展示的实验岩石学的新进展主要集中在地幔相变的研究上。同时，从另一方面来说，高温高压的实验已有相当的基础和相当高的研究水平，再要进一步地提高则需要依靠新领域或新材料上的突破。因此，有些学者不想再重复走高温高压实验的老路，而是另辟途径，将重点放在低压上和低温低压与硫化物金属矿物相互关系的研究上。

高温高压的熔融实验表明，在相同的地幔源岩条件下，制约幔源岩浆组成的主要变量除压力和温度外，地幔的 C-H-O 系统是第三个主要变量。幔源岩浆的熔融实验在干系统不能产生碧玄岩这样的碱性玄武质岩浆，只是在小于 2%熔融程度时，在固相线附近才能形成碱性橄榄玄武岩，熔融程度稍增加，就形成橄榄拉斑玄武岩，然后是苦橄榄岩浆。如加入少量 H_2O，则能形成碧玄岩岩浆。如再加入 CO_2，才能产生霞石岩、金伯利岩等 SiO_2 高度不饱和岩浆。这说明，在地幔条件下，H_2O 的加入有利于生成 SiO_2 饱和度小的岩浆。超高温高压实验还可以提供深地幔和地核的成分模式，并测定地幔岩的摩尔体积、弹性、电导率、光学吸收和放射衰变率等重要物理数据。

当前特别重视模拟下地壳、上地幔条件下的相变，并已发现了一些新的高压超高压变质矿物和不少含水的超高压矿物，其中有些矿物已在自然界发现。相变研究的另一特点是，从矿物相随 p-T 条件转变的研究发展为对某类岩石在某种构造环境下的动力学过程的模拟，例如地幔二辉橄榄岩在自然条件下由石榴子石二辉橄榄岩到尖晶石二辉橄榄岩的转变的模拟，证实石榴子石转变为尖晶石的稳定范围至少在 15×10^5 kPa 以上，模拟消减大洋的大洋岩石圈中水的释放被认为是 70～150 km 的上地幔中岛弧岩浆产生的关键，而释放的水的数量则依赖于低温高压条件下玄武质岩石中含水矿物的稳定性。

4.4.4 展望

火成岩岩石学的发展趋势是：①跳出单一的纯岩石学的研究范畴，进行高层次跨学科的综合研究，更准确地阐明岩石圈的组成、结构和演化，并将其纳入全球地球科学或全球动力学研究的一个重要组成部分；②一个学科要有生命力，必须扩大服务对象；火成岩岩石学除了在资源方面发挥作用外，还要在解决环境、工业、农业等问题上有所作为，最近的火山爆发，如东南亚印尼火山喷发释放出大量含硫气体和灰尘，其在数年内对降低全球温度方面的作用及对整个环境的影响目前还不清楚，采用 MELTS 程序等算法定量模拟岩浆及其挥发分含量可对其作出定量预测，并对气候变化与火山活动之间关系提供答案；③建立各种精确的数据库，对岩浆作用在深部及地表过程中物理化学作用过程进行模拟，在数据库基础上，通过大批量数据进行聚类分析、判别分析、主成分分析等，为不同地区、不同时代火成岩进行大范围的对比提供依据，利用因子分析、对应分析和趋势分析可探讨火成岩的成岩成矿过程的控制条件和物质成分在二维或三维空间中的变化趋势；④进一步发现和深入研究大洋深处“热烟囱”、热水热气和成矿问题，这是了解地球深部奥秘的天然窗口，重要意义是不言而喻的。

4.5 变质岩石学和前寒武纪地质学

变质岩石学和前寒武纪地质学是地质学中研究难度很大的基础学科。90 年代地质学研究特别注意岩石圈深部和全球变化两个方面的主题，而前者就与变质岩石学和前寒武纪地质学的研究密切相关。当前的热点主要集中在：①变质作用的 p-T-t 轨迹；②高压超高压变质和麻粒岩；③变质流体；④前寒武纪陆壳性质、形成和演化。

4.5.1 变质作用的压力-温度-时间（p-T-t）轨迹

变质作用研究已从以往的静态研究进入到目前的动态研究。静态是借助于实验岩石学的成果来确定岩石生成的温压条件。变质作用是发生于地壳中的热事件。在一次变质事件中其影响所及的地壳大体都经历了温压增高，到达高峰状态，然后降温和减压这样一个全过程。所以就温压条件来说，变质作用是随时间进程而连续演化的动态过程，其特点与当时大地构造背景和动力学机制密切相关。因此，查明变质作用的 p-T 条件在时间（t）上的变化态势是建立其与大地构造体制之间成因联系的最主要的桥梁和纽带。1984 年 P. C. England 和 A. B. Thompson 合作，对陆壳碰撞带大陆增厚事件中区域变质作用的岩石 p-T 条件在时间上的演化规律进行了全面的热模拟，针对相应的矿物组合变化，正式提出了变质作用的 p-T-t 轨迹的概念。这是指造山带在一个独立的构造旋回和相应的一次变质事件全过程中，其陆壳岩石所经历的温度和压力的连续变化态势。变质作用 p-T-t 轨迹的研究现主要有 3 个方面。①对造山带的动力学过程进行热模拟，早期模拟方法都是以一维的热传导为前提，即不考虑岩浆和其流体加入所引起的热对流作用，并假定地壳底面来自地幔的热量是固定不变的。事实上造山带地壳中热变化历史不可能如此简单，近来已有不少关于 p-T-t 轨迹二维热模拟的成果。第 30 届国际地质大会上有这方面成果的报道，并提出了 3 种类型造山带的 p-T-t 轨迹，讨论的焦点集中于 p-T-t 轨迹热模拟所依据的边界条件。目前，以造山带岩浆大规模加入为特点的动力学过程的热模拟正在广泛开展；今后，将造山带的 p-T-t 资料与热模拟相结合的研究可以促进 p-T-t 轨迹正演的准确性。②根据地质和

岩矿资料反演变质作用的 p-T-t 轨迹及其动力学过程。显然，p-T-t 轨迹研究正演与反演相结合，岩石学研究与热模拟相结合，是提高热模拟和 p-T-t 轨迹研究正确性的重要途径。③在 p-T-t 轨迹研究过程中，应重视变质矿物的成分环带、变质矿物中的流体包裹体、同位素年代学资料和各种矿物不同封闭温度等因素。当然，变质作用 p-T-t 轨迹的研究在目前从概念到方法都存在一系列问题，如：变质事件和变质幕的准确概念和区分标志；造山带热历史和态势在空间上的不均匀性如何研究和表达；局部和全区性（具有不同时间跨度）的 p-T-t 轨迹如何识别；各阶段 p-T 状态下，真正的时间（t）如何确定；用几个阶段的 p-T 状态推断全过程的 p-T-t 轨迹时存在的不确定性如何解决等问题，都有待于进一步解决。但无论如何，变质作用研究已从变质相为基础的静态研究转变为以变质作用演化的 p-T-t 轨迹为主题的动态研究。许多事实也证明，p-T-t 轨迹已成为研究变质成因和变质作用构造环境的一种有效方法，它对今后的变质地质学的研究必将产生重大影响，并大大促进变质地质学学科的发展。

4.5.2 高压超高压变质和麻粒岩

高压超高压是变质地质学中进展最快的研究领域之一，具体表现在①含柯石英和金刚石的超高压变质岩的产地增加，如保加利亚、俄罗斯、哈萨克斯坦、瑞士阿尔卑斯、蒙古及我国大别山等地。②近来对变质岩中金刚石等矿物是否均为超高压的产物有所争论。③发现多硅白云母是超高压岩石的一种很好的指示剂。④了解到超高压变质岩内菱镁矿矿物组合的意义，即菱镁矿是地幔条件下稳定的一种主要碳酸盐，能储存上地幔和下地幔的碳，也可以作为俯冲板块内碳的携带者。⑤我国对大别山高压超高压变质带做了不少工作，并取得了可喜的成果。

高级变质区，尤其是麻粒岩相变质地体，是认识大陆岩石圈下地壳的直接窗口，因为麻粒岩被认为是下地壳环境中的产物，所以对它的研究特别受到重视。通过对麻粒岩的研究可以帮助我们了解地壳深部的结构、组成、作用过程和动力学特征。R. C. Newton 总结了麻粒岩形成的 3 个机制：①部分熔融吸收了岩石中的 H_2O；②由于深部地壳来源的 CO_2 流体的进入；③浅部接触变质的烘烤作用驱赶了岩石中的水，而导致干化作用和麻粒岩的形成。目前，像麻粒岩这样的高压超高压变质岩体的地球动力学模型主要以俯冲-拉伸作用作为主要动力学机制，但所有模型都未涉及到如何把深部的高压超高压变质岩体折返到浅部地面的机制，这是今后要努力解决的问题。

4.5.3 变质流体

以往对流体的研究主要集中在对成矿、成岩作用过程中流体作用的研究上。最近，流体在变质过程中的作用逐渐受到人们的重视。变质流体和深部流体的研究发展很快，因为任何一个变质反应都与流体作用有关。对阿尔卑斯道拉玛亚榴辉岩和我国大别榴辉岩中含绿辉石、黝帘石、蓝晶石的高压岩脉的研究证实，超高压变质过程中伴随有流体的运移。氧同位素的研究则表明，大气降水曾参与了超高压变质过程。但也有相反的另一种情况，粒间柯石英的残存又暗示了在退变质过程中，流体并非处处存在。但不管怎样，对变质流体的研究可帮助我们解决岩石成因问题以及地壳与地幔相互作用机制等基础地质问题，如麻粒岩的成因，尽管尚有较大争论，但均认为 CO_2 流体是重要控制因素。在变质相划分方面，传统的划分方法是以温压条件进行划分的，而没有考虑流体的性质对变质相的重要控制作用。因此，新的方法应以温度-压力-时间-流体共同作为划分变质相的依据。近来，变质流

体研究在解决麻粒岩成因以及角闪岩相与麻粒岩相之间的关系问题上作出了重大贡献。由于流体性质对变质相具有重要控制作用，特别是角闪岩相与麻粒岩相转换带是流体性质发生改变（流体由 H_2O 为主转为 CO_2 为主）的关键地带，这也符合上述的麻粒岩的形成离不开 CO_2 流体的参与的推测。今后随着大陆动力学研究的深入，根据变质流体研究成果，探讨变质作用演化及其动力学机制，建立流体演化压力-温度-流体（pTF）和压力-温度-流体-时间（$pTFt$）轨迹将成为变质流体研究的前沿课题。

4.5.4 前寒武纪陆壳性质、形成和演化

前寒武纪陆壳性质、形成和演化是了解早期地球历史的关键。在陆壳生长问题上，许多学者认为前寒武纪时大部分（80%）地壳已经形成，而且认为前寒武纪地壳生长速率明显高于显生宙。在生长模式上，有板底垫托模式、地幔柱上涌模式、岛弧模式、板块聚合边界碰撞型式等等。前两种模式是陆壳垂向增长的主要形式；而后两种模式以水平增生为主。总之，陆壳生长的物质是以地幔来源为主，有少部分再循环产物，包括岩浆添加、地壳的推覆和叠置、微板块及岛弧的聚合以及大陆边缘的沉积楔等。生长方式可以是垂直的，也可以是水平的。生长期主要为前寒武纪。太古宙大陆生长形式可能以垂直增长为主。也有一些学者，如澳大利亚的 A. Nufman 认为，太古宙时期，陆壳生长过程主要是以大量原始硅铝壳的块状再循环为主要形式，而那些原始硅铝壳现已不复存在。在元古宙，几种陆壳生长模式都可能存在，而显生宙陆壳生长可能是以岛弧或消减俯冲作用为主。有些学者认为，早前寒武纪形成的陆块构成了现今大陆的主体，而且地壳性质与现今地壳相似，即大陆地壳在地球早期有一形成高峰期，而不是以往认为的随着时间推移逐渐扩大的陆核增生模式，因而将板块构造运动及演化模式推早到新太古代。当然，板块体制能否适用于前寒武纪，迄今还是一个有很大争论的问题。

对陆壳的形成和演化的研究，除变质地质、大地构造之外，地球化学、同位素、古地磁等也都是重要的支柱。在地球化学方面，除继续研究常量元素外，要注意微量元素的研究，特别是稀土元素研究。当前一般采用综合分析，并讨论其制约关系，以便了解陆壳物质的成因和演化。在同位素方面，除稳定同位素外，主要是同位素年代学工作。现已测定出地球最老的表壳岩年龄为 4000 Ma，说明约在 4000 Ma 以前，地球上已经有水圈存在，而且有可能已有原始生命存在。我国亦测得有老于 3800 Ma 的岩石。前寒武纪同位素年代学的成果无疑对陆壳生长、构造-热历史时代、年代-构造格架和事件序列等研究具有重大影响。前寒武纪板块构造的聚离史和块体运动等基本问题还得依靠可信的古地磁资料。最近，H. C. Halls 在早期古陆块的裂解拼贴研究中，用不同时代的基性岩墙作标志取得了重大进展；他用云雾状长石的磁性物质的古地磁性质，判定线性分布的岩墙各段的形成深度（km级），从而确定不同时代的岩墙群所在古陆块演化史的不同倾向及剥蚀深度，从而大大提高了陆块拼接的适应性和可信度。

4.5.5 展望

针对变质岩和前寒武纪地质研究的难度和特殊性，今后工作更要重视多学科和多种技术方法的交叉、渗透和综合。变质作用的研究从静态发展到动态，从定性发展到半定量和全定量是必然的发展趋势。今后的研究不仅仅限于变质岩和变质作用本身，还需推广到变质作用与大地构造环境、变质与变形关系、原岩建造与变质建造内在联系、变质作用与岩浆作用关系等方面；它们之间是相互联系和互相制约的，所以要从成因联系、演化发展、动

力学机制等深层次上进行深入的研究。变质岩成因研究要借助于微量元素地球化学、同位素地球化学以及包裹体成分的深入研究。要重视野外、实验与模拟工作以及它们之间的相互结合。今后变质岩和变质作用的热点仍将在 p-T-t 轨迹、高压超高压变质带和高级变质区的研究上，尤其是它们的剥露机制与改造过程，以及变质流体的深入研究。

在地球科学中非常重要的课题是地球的起源和演化。它需要在前寒武纪地质研究上的深入和突破。因此，地球起源及地球早期地质演化应作为长期探索和坚持研究的重要方向。其次是前寒武纪统一地质年表的建立。长期以来整个地球史地质年表只有显生宙划分比较深入详细，并得到广泛的使用；前寒武纪划分粗浅，而且各国也不相同，当代地球科学的发展，需要高精度的地质年表，对前寒武纪来说，更是当务之急。随着地质工作的深入和科学技术的进步，逐步建立和完善前寒武纪统一的地质年代表已成为可能。此外，要充分注意地球早期的地壳和深部地壳的研究，前寒武纪地质正是了解它们的窗口。将前寒武纪研究与岩石圈研究结合起来，将会进一步推动大陆岩石圈研究工作的深入。

尽管变质岩和前寒武纪地质研究难度很大，但 20 年来的实践证明，这一学科的发展仍是相当迅速的，这主要归功于新理论、新技术、新方法的出现和应用。变质岩和前寒武纪地质研究是探索地球起源和演化、岩石圈组成和结构、地球动力学、地球深部结构过程中不可缺少的内容，理应受到地学界的高度重视，我们需要有长期奋斗和锲而不舍的精神，耐心而深入地进行探索和研究，促进这一学科的发展，使其在现实中有更广泛的应用。

4.6 构造地质学

构造地质学是地质学中最具有活力和创造性的学科之一，这不仅是因为构造地质学的研究对象在时间上和空间上（包括水平的和垂直的）具有很大的跨度，而且它还涉及到许多其他学科，同时对它的研究又能很好地为社会和人类服务。此外，构造地质学还是地学界创造理论和假说最多的学科。板块构造学说的提出是地质学上的一次革命，它不但促进了构造地质本身的发展，而且还推动了其他学科的发展。然而，30 年来的实践证明，板块构造学说也有它的局限性，尚不能完全合理解释大陆地质的一些问题，因此不断有新的学说提出，如 90 年代的全球动力学等。这是对板块构造学说的修正和发展，也是构造地质丰富多彩、学术繁荣的表现。当前，构造地质学的热点集中在大地构造、造山带、岩石圈动力学、深部构造等方面，它们将在其他章节中加以叙述和讨论。本节主要讨论中、小尺度的构造，包括：①逆冲推覆构造，②走滑伸展构造及变质核杂岩，③走滑断层和④显微和超显微构造。

4.6.1 逆冲推覆构造

逆冲推覆构造主要发生在造山带及其前陆和活动性较强的地台上。板块构造提出后，人们认识到冲断构造（thrust）和推覆构造（nappe）是板块会聚边缘变形作用的关键标志。前陆褶皱冲断系脱胎于早期的冲断-推覆构造，即强调褶皱与断层的密切关系。地层由于吸收了下伏冲断层的位移而形成褶皱，当褶皱已不能完全吸收下伏冲断层上持续增加的位移时，断层将向前或向上扩展，于是新的断层形成。新的断层再形成新的褶皱。这种断层-褶皱之间的转换关系在冲断活动中持续进行。前陆薄皮式冲断推覆构造越趋向于造山带，与中深层次或深层次的韧性剪切带的关系就越接近。一些著名的造山带，如喜马拉雅、阿尔卑斯、

秦岭、阿巴拉契亚等造山带，其前陆为脆性冲断推覆构造，到造山带，往往为韧性冲断剪切带。冲断推覆产生的不同类型、不同级别、不同强度的褶皱被称为断层相关褶皱构造。形成机制分为 3 种主要类型：断层转折褶皱作用、断层褶皱作用和断滑褶皱作用。

冲断构造经常出现一系列被冲断席体分隔的顶底板断层，称为双重构造。冲断构造带中常见有两组倾向前陆的反冲断层。逆冲带内各席片的逆冲顺序研究始于 80 年代，主要划分为两种方式：一是上叠式（over lap），即前缘下部断层先产生，后陆上覆断层后出现；二是背驮式（piggy back），显示早期构造应力方向与后期的相反，使同一断层的性质随时间发生相反的转变，即前期为正断层的（或逆断层），后期变为逆（或正断层），这就是反（倒）向构造或反转构造。

平衡剖面技术源于 50～60 年代石油勘探中的油田地质研究。近年来，一系列的断层相关褶皱理论使平衡剖面技术日趋精确和完善，并逐渐应用于挤压性的造山带和张性构造区的研究中。所谓平衡剖面即为"一条能够依据一定原则，复原到未变形状态的合理剖面。"所谓"合理"就是要满足多种资料和条件的制约。

由于冲断推覆构造在其前陆地带的普遍存在，及其在探讨盆山耦合关系、油气勘探、地震活动等方面的重要作用，因此其几何学和运动学特征以及动力学过程仍是研究的重点。

4.6.2 伸展构造及变质核杂岩

岩石圈构造变形的最基本形式是挤压、伸展和走滑。伸展构造的样式主要表现为各种伸展断层性质及其伴生的不同地壳结构特征常随地壳深度而发生变化，自浅层次往深层次，依次出现：上地壳的伸展构造形式为滑脱正断层及伸展断块；中地壳的伸展构造形式为脆-韧性拆离断层及变质核杂岩；下地壳为韧性展平、韧性剪切带。岩石圈深部伸展过程可能与地幔软流圈的部分熔化作用有关。伸展构造的早期研究集中于浅层次高角度正断层上。70 年代美国发现了大量低角度正断层，这些拉伸的正断层即拆离断层，是指盖层与基岩之间的滑脱断层；因为它强调由于断层作用使下盘的地壳深部岩石逐渐被剥露出地表，或被年轻沉积物所覆盖，故也称为剥露断层。80 年代在科迪勒拉山脉的低角度正断层研究中，G. A. Davis 将那些早期形成的低角度基底滑脱面在后期地壳缩短变形过程中发生弯曲，形成穹状隆起，使下盘糜棱岩化或其他动力变质的岩石得以出露的构造进一步命名为"变质核杂岩"，接着世界各地报道了许多这方面的研究成果。我国对此研究也方兴未艾，推及到燕山、太行山、大别山、小秦岭、武当山、雪峰山、川西、云南、西藏等地。这些工作成果说明了变质核杂岩构造的复杂性与构造运动的多幕性。它打破了美国典型地区形成于第三纪的简单的伸展构造与变质核杂岩隆升的一次伸展的变形模式，提供了不同时期变质核杂岩及其多次不同方向的伸展的事实，同时强调了同构造花岗岩类侵入体在变质核杂岩隆升中的作用，强调了上地幔向大陆壳的热和流体的传送，可能引起地壳的局部熔融和花岗岩类侵入体的形成，热上浮和底辟式侵入的岩体及热软化是变质核杂岩隆升的重要原因。我国已鉴别出几十条重要的并且是大型的韧性剪切带，它的研究已进入到划分类型、探讨动力学过程及其与成矿关系的阶段，尤其是金矿的富集与韧性剪切带的关系十分密切。

4.6.3 走滑断层

走滑断层是指一些断面近于直立、断面一侧相对于另一侧沿走向发生水平滑动的断层。其特征是平直的断线、陡立的断面及较窄的断层带，分左行及右行。走滑断层按卷入深度可分为转换（Transform）断层、平移（Transcurrent）断层、变换（Transfer）断层、嵌入

(indent linked) 断层和捩 (tear) 断层。走滑断层普遍伴生有相关构造，其类型有：雁列褶皱、走滑盆地（拉分盆地、挤压和扭张盆地)、花状构造、走滑双重构造、走滑旋转构造、诵书构造等。走滑断层是地球上大规模水平运动的直接证据，分布极其普遍，而且位移巨大。其形成机制可采用纯剪切模式或简单剪切模式；长期以来，运用纯剪切模式来说明较多，但造成数百公里以上的位移的大规模走滑断层只能采用简单剪切模式，世界上包括我国均有位移数百公里以上的走滑断层，如北美圣安德烈斯断层、苏格兰大谷断层、新西兰阿尔平断层、阿富汗恰曼断层、东北亚锡霍特—阿林断裂等，我国有著名的红河断裂、阿尔金断裂、郯庐断裂等。对郯庐断裂的研究最为深入，被公认为是巨型走滑带，但也有相当大的观点分歧。有些地段由于弯曲张弛呈现伸展断层性质，而另有一些地段由于弯曲挤压而呈现为逆冲断层。较多的研究者认为，郯庐断裂的主要走滑高峰期为早白垩世。

走滑断层的断面下切较深，两盘走滑剪切摩擦的能量大部分可转化为热能来加热断裂带岩石，如现今地震活动的平移断层呈现为地壳上高热流的异常带。在成矿作用上，通过走滑断层剪切增温，使得围岩（矿源层）中的某些有用元素富集成矿，尤其是金矿，经常出现糜棱岩型金矿；剪切成矿一般以低温超低温矿床为主。此外，走滑断层可把已成矿体和矿带错开，因此依照错开位移规律，可以预测新的矿产地。许多矿脉的产生也往往与走滑断层作用的张裂空间有关。我国大陆内部许多的浅源地震带，大多数属于走滑断层型。因此，加强对走滑断层的研究，对矿产预测和地震灾害预防上均有重要的实用价值。

4.6.4 显微和超显微构造

显微和超显微构造是研究构造地质的重要手段，过去主要局限于对变形岩石组构的几何对称性分析及运动学意义的探讨上。近年来，它打破岩石学界线，被用来解释区域构造甚至全球构造。显微构造不仅有助于正确鉴定各种小型构造的性质，而且能提供构造变形机制、变形环境、构造的运动学和动力学以及变形史各方面的信息。高压透射电镜的使用，可揭示出矿物晶质塑性变形的超微观机制。最近十多年来，已经较深入地研究了多种造岩矿物和岩石的塑性、位错和其他显微构造，并经常用于确定韧性剪切的方向；指示剪切运动方向的显微构造有面理构造、碎斑系、书斜式构造、单斜对称的压力影、片内不对称褶皱、石英和方解石的斜组构等。此外，定量计算岩石所受的应变量、韧性剪切带的位移量、造山带的缩短量也是显微构造研究的重要方面。

当前显微和超显微构造的研究主要集中于两个方面：一是以实验岩石变形为主的显微构造研究，以探讨不同条件下的岩石变形机制和其特有的显微构造；二是把显微构造与区域构造相结合，解决区域构造问题。

4.6.5 地质力学

地质力学由李四光在 1921 年首创。其后经过长期的尤其是 1949 年以来广大的地质工作者 50 年的努力，这一学科得到飞速的发展。它建立了亚洲和我国的重要构造体系以及构造型式，尤其是几个巨型构造体系的生成、发展和演化的研究，如新华夏构造体系、青藏歹字型构造体系、东西向构造带（阴山—天山带、秦岭—昆仑带、南岭等）等。构造型式上有多字型、山字型、歹字型、入字型与帚状等。地质力学认为，地球自转不均衡所产生的水平力量是发生地壳运动和形成各种构造体系的主要原因。1996 年第 30 届国际地质大会上反映出地质力学的全球观向着更深更广的领域发展，从过去着重研究大陆构造到现今将全球构造和海底构造结合起来研究，尤其是结合海底年代学资料，从发展演化的眼光将

构造体系的改造和建造结合起来研究；从构造体系的力学研究逐渐拓展到构造体系的地球物理、地球化学背景方面的研究。

地质力学在现今地应力测量和现代地壳运动方式上也作出了重要的贡献。它已建立了完善的地应力测量的理论基础、先进的测量方法和仪器设备，有先进的软件系统，包括地应力数据处理软件、有限元和边界元应力计算软件，可用来处理非线性问题，如岩石的弹塑性、粘弹性、介质的应变软化及硬化、非稳定性破坏过程的应力计算等。此外，在技术方法方面，近来亦有长足的进步，如计算机技术、岩石力学性质的测定、构造应力场的分析和模拟实验。

地质力学在油气普查勘探、矿产地质、矿田构造、工程水文地质、地震、地热及地壳稳定性评价方面都发挥着重要的作用。近年来在区域稳定性评价上更为突出，如李晓等作出的《1：500万中国区域地壳稳定性图》，通过模糊综合评价、图像识别和专家系统等手段，得到了定量化的区域稳定性评价指标和参数。日本学者针对深部地下工程，根据日本岩石的地质力学性状，进行了非常有实用价值的岩体稳定性分类。

地质力学在发展过程中，除了要加强本身的基础理论研究外，还要发挥自身的优点和特长，尤其是在近代构造活动、现今地应力场测量研究以及矿产和构造体系的联系等方面，要为我国经济建设作出更大的贡献。

4.6.6 展望

从发展趋势来看，地球科学的许多研究都将围绕地球构造问题而展开，同时构造地质学和地质力学又具有广阔的服务领域。今后的研究方向包括：①在探索逆冲推覆、伸展构造、走滑断层等各种构造过程中，要力求宏观和微观相结合、多学科互相渗透、多种技术方法和测试进行综合研究；②从岩石圈动力学、构造流变和物质能源交换方面来揭示以上构造的动力学和形成机制；③除注意几何学外，应加强运动学的研究，将上述构造的发生发展、运动速率和运动方位及其变化运移距离和构造性质转换的全过程定量化；④构造物理模拟及计算机数字模拟和⑤扩大服务领域。

主要参考文献

马昌前，王人镜，邱家骧．1992．花岗质岩浆起源和多次岩浆混合的标志，包括——以北京周口店岩体为例．地质论评，第38卷第2期，109～119．

邓晋福，赵海玲，罗照华．1993．现代火成岩岩石学．见肖庆辉等．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，274～279．

卢良兆．1993．变质作用的 PTt 演化与地质动力学．见肖庆辉等．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，326～331．

刘特音．1992．八十年代地质力学的新进展．见：中国地质学会编．八十年代中国地质科学．北京：北京科技出版社，26～31．

李兆乃，白文吉，张寿广．1992．八十年代中国岩石学研究的主要成就和今后努力方向．见：中国地质学会编．八十年代中国地质科学．北京：北京科技出版社，11～18．

许效松．1996．沉积地质学研究现状和进展在第30届国际地质大会上的反映．四川地质学报，第16卷第4期，289～293．

吴正文．1995．中国构造地质学如何面向21世纪．地学前缘，第2卷第1期，1～8．

庄育勋．1994．中国阿尔泰造山带热动力时空演化和造山过程．长春：吉林科学技术出版社．

宋力生．1993．地层学和古生物学概述．见：肖庆辉等．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领

域．武汉：中国地质大学出版社，203～205.

陈丰．1993. 矿物物理学．见：肖庆辉等．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，266～270.

陈毓川，张之一，项礼文等主编．1997. 90年代地球科学的动向——第30届国际地质大会学术报导．北京：地质出版社．

罗永国．1997. 国外地质科学的一些最新进展及相关的几个问题．国外地质科技，第1期，1～29.

张炳熹编．1987. 当代地质科学动向．北京：地质出版社．

洪大卫，王式洸．1993. 花岗岩地球动力学．见：肖庆辉等．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，322～325.

洪大卫，王式洸．1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志，中国科学，B辑，第25卷第4期，418～425.

贾振远，蔡忠贤．1997. 层序与旋回．地球科学，第22卷第5期，449～455.

贾跃明．1993. 前寒武纪地质概述．见：肖庆辉等．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，379～381.

龚一鸣，李保华．1999. 高分辨率地层学与Milankovitch旋回和ENSO事件沉积．地质科技情报，第18卷第2期，32～36.

舒德干，陈苓．1993. 软躯体化石库的研究．见：肖庆辉等．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社，223～227.

Allen P A and Allen J R. 1990. Basin Analysis: Principles and Applications. Oxford: Black-Well Scientific Publications.

Bartley J M, Fletcher J M and Glazner A F. 1990. Tertiary extension and contraction of Lower-Plate Rocks in the Central Mojave metamorphic core complex, Southern California. Tectonics, 9 (3): 521～534.

Burnham C W. 1981. The Nature of multicomponent aluminosilicate melts. In: Richards, D T & Wickham F Z (eds.). Chemistry and geochemistry of solutions at high temperature and pressure, physics and chemistry of the earth. New York: Pergamon Press, 197～229.

Condie K C. 1992. Proterozoic Crustal Evolution. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

Crittenden M D Jr, Coney P T and Davis G H (eds.). 1980. Cordilleran metamorphic core complex. Mem. Geol. Soc. Amer., 153.

Davis G A and Liser G S. 1988. Detachment faulting in continental extension: perspectives from the south-western U. S. Cordillera. John Rodgers Symposium. Spec. Pap. Geol. Soc. Amer., 218: 133～159.

Hailwood E A and Kidd G B (eds.). 1993. High Resolution Stratigraphy. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

Haq B V, Hardenbol J and Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 Myr age to present). Science, 235: 1156～1167.

Haq B V, Hardenbol J and Vail P R. 1988. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and eustatic cycles. In: Wilgus C K, Hastings B S, Posamentir M, et al. (eds.). Sea-level change: an integrated approach. SEPM Spec. Pub. 42, 71～108.

Miall A D. 1990. Principles of Sedimentary Basin Analysis (Second Edition). New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo: Springer-Verlag.

Miall A D. 1991. Sequence stratigraphy and their chronostratigraphical correlation. Jour. Sediment. Petrol., 61 (4): 497～505.

Newton R C. 1985. Temperature, pressure and metamorphic fluid regimes in the amphibolite facies to granulite facies transition zones. In: Tobi A C & Touret J L R (eds.). The Deep Proterozoic crust in the North Atlantic Provinces. Dordrecht: Reidel, 7～104.

Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 23: 251～285.

Pitcher W S. 1993. The nature and origin of granite. London: Blackie Academic and Professional.

Runnegar B. 1986. Molecular palaeontology. Paleontology, 29 (1): 1～24.

Schopf J W and Klein C (eds.). 1992. Evolution of the Proterozoic Biosphere——A multidisciplinary study. New York: Cambridge Univ. Press.

Schwarzacher W. 1993. Cyclostratigraphy and Milankovitch Theory. A msterdam: Elsevier Science Publishers.

Seilacher A. 1989. Vendozoan: organismic construction in the Proterozoic biosphere. Lethaia, 22 (3): 229~239.

Taylor S R and Mclennan S M. 1985. The Continental Crust: Its composition and Evolution. Oxford: Black-Well Scientific Publications.

Vail P R, Mitchum R M Jr and Tompson Ⅲ S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap. In: Payton C E (ed.). Seismic stratigraphy applications to hydrocarbon exploration. AAPG. Mem., 26: 63~82.

第 5 章　研究地球的新技术新方法

20 世纪 70～80 年代是高科技飞速发展的时代。这些高技术已逐渐渗透到地球科学的各个领域，正在引起地球科学技术新的变革，推动着地球科学技术的发展。这一时期，在地球科学技术领域，形成了四大体系，即：观测与探测技术、物质测试与分析技术、模拟与实验技术和计算机与处理技术。这四大科学技术体系将成为 21 世纪地球科学发展的强大支柱，推动地球科学特别是地球科学前沿领域的出现与发展。这一时期在地球科学技术领域出现了不少新仪器和新技术，如在观测与探测技术方面出现了陆地卫星、全球定位系统、地理信息系统、遥感系统、大陆反射剖面、移动式地震台网、大陆超深钻、海底制图测量、深海钻探和深潜技术等；在物质测试与分析技术方面出现了加速器质谱仪、同步加速器光源、自动化多集质谱仪、移动式热红外光谱仪、新的微束分析技术、高分辨率核磁共振技术、同步加速器辐射技术和显微原位分析技术等；在实验技术方面出现了高温高压大腔体实验技术等；在计算机技术方面出现了矢量程序设计计算机等。

即将到来的 21 世纪将是人类继续不断地向宇宙空间、海洋深层和地球深部进行进一步探索的世纪。因此，与宇宙空间、海洋深层和地球深部研究有关的高新技术的研究和利用无疑将是地球科学技术的主要发展前沿（肖庆辉，1993)。为适应板块学说的进一步发展和大陆岩石圈动力学研究的需要，古地磁方法技术的改进特别是它的可靠性和数据判断的研究将是今后研究的前沿课题。

这一时期大陆岩石圈研究方法的转变主要表现为从单一的地质或地球物理探测向建立综合地质、地球物理和地球化学研究成果的综合模型的转变。这集中体现在“全球地学大断面（GGT：Global Geoscience Transects)”计划。该计划是由国际岩石圈委员会于 1985 年提出的。到 1989 年，在全球已规划设计了约 171 条大断面，其中欧洲 9 条，原苏联 12 条，中国（包括台湾在内）和日本 21 条，印度 3 条，东南亚 1 条，中东 16 条，北美洲 12 条，南美洲 30 条，非洲 41 条，澳大利亚和新西兰 11 条，南极洲 14 条，北极 1 条。每一大断面为长数百至数千公里，宽 100 km 的走廊式条带。利用大断面所穿过地区的所有地质、地球物理和地球化学资料来研究全球范围内的深部构造。其研究深度至少达莫霍面，若条件允许，可达岩石圈下部和软流圈。它不是资料的简单积累而是对资料加以处理和综合、分析后的结果。实际上是地壳或上地幔的垂直构造图，是对断面地区地壳（和上地幔）的性质、物质构成、成因演化和动力学特征等的综合反映。

5.1　遥感技术和地理信息系统

遥感技术和地理信息系统是 20 世纪 70 年代发展起来的新兴技术领域。它们与最近发展起来的全球定位技术一起为当今地球科学研究提供了全新的手段，导致了地球科学研究范围、内容、性质和方法的巨大变革，标志着地球科学的一场革命。与传统的对地观测手

段相比，其优势在于能够提供全球或大区域的定位精确的高频度宏观影像，因而能够揭示岩石圈、水圈、气圈和生物圈的相互关系和相互作用，从而促进了地球系统科学的诞生。这些技术将人类认识的波谱范围从可见光扩展到红外光和微波范围，从而进一步深化了人类对地球的了解。在遥感与地理信息系统基础上建立起来的数学模型为定量化分析奠定了基础。同时，这些技术还实现了地球科学研究中空间和时间的转移：在空间上将部分野外工作转移到实验室；时间上从对过去与现在的研究转移到在三维空间上定量地预测未来（徐冠华，1995）。

5.1.1 遥感技术

地质遥感（RS：Remote Sensing）方法始于20世纪40年代，当时主要是利用大、中比例尺的航空图片进行目视解译。后来这些方法又应用到星载遥感图像中，如应用到可见光、热红外光和雷达图像中等。

70年代以来，陆地卫星遥感技术的工作波段从可见光-近红外光扩大到可见光-近红外光与热红外光，传感器ETM和ETM＋TM增加了P波段（520～900 nm），提高了空间分辨能力（从15 m到10 m再到5 m）。

进入80年代，地质遥感方法出现了质的飞跃，主要表现在能够：①以数字记录方式获取空间信息；②利用计算机处理地表图像和③利用地理信息系统将多元数据结合分析，如对遥感、地球物理、地球化学和地质数据进行分析。新一代的工程遥感以数字形式记录，可获取机载或星载遥感电磁波谱中不同波段的信息，分低（1000 m）、中（600～30 m）、高（10～2 m）3种分辨率。被动遥感可获取频段很宽的回波信号；主动遥感尤其是雷达遥感可获取或记录不同极化状态的数据。

20世纪90年代遥感技术研究有2个前沿方向：一是成像光谱遥感技术；二是成像雷达遥感技术，而以后者发展尤为突出。自1991年以来，人们已先后发射入轨6个星载及航天机载合成孔径雷达（SAR：Synthetic Aperture Radar）。

20世纪末的遥感技术在应用上有2个特点：其一是遥感数据的来源不断拓宽、更新以及数据的分辨率和精度的不断提高，因而使人们对图像数据的使用有了选择的余地，可利用的数据除陆地卫星（Landsat）外还有Spot、Radarsat、Moms、ERS-1、JERS-1和中国的资源卫星提供的数据以及航空遥感数据等。1990年，美国对南半球海域的高精度星载雷达测高数据（Geosat/GM）解密。同时，用于提高测量覆盖率和换算精度的多星、多轨道数据加密技术得到解决，使星载雷达测高技术用于海底地形、构造研究与制图达到一定程度实用化。加拿大于1995年发射的Radarsat-1雷达卫星标志着星载微波遥感的突破性进展。该卫星对扫描式成像可分别做500 km宽幅带、100 m地面分辨率和50 km宽幅带、优于10 m地面分辨率两种成像模式。1997年底，1 m分辨率的Space Imaging EOSAT的先期卫星CARTERRA-1发射升天。1996年日本首次发射了用于全球变化研究的“高级地球观测卫星”（ADEOS），对陆地和海洋进行精确的数据采集和成图。其二是遥感图像数据处理方法的不断完善和应用领域的不断扩大。其应用范围不但有地质资源调查、环境、工程、铁路勘测，还有煤层自燃、森林火灾和洪水灾害监测等。

美国首次发射了磁卫星MAGSAT，用于全球磁力矢量测定，并据此将地球磁场分为核心场、壳源场和外部场3部分。另外，利用卫星轨道参数变化可获得多级大地水准面形态及地球南北半球的非对称关系。

空间技术、信息技术和计算机技术的发展，推动了卫星遥感技术的进步。遥感影像空间分辨率和光谱分辨率的提高扩展了它的应用领域。计算机运算速度和容量成数量级的增加、数据库技术和网络技术的发展以及人工智能的应用为分析处理大数据量的遥感和地理数据创造了条件。而数学模型作为联系遥感、地理信息系统与实际应用之间的纽带则处于十分重要的位置。

未来遥感技术的发展趋势是综合对地观测系统的建立。这一观测系统由航天、航空和地面观测组成，具有提供定位、定性和定量数据的能力。这一系统又是一个全天候、全方位的综合系统，能对地理、生物、地球物理场和化学过程进行全面调查，从而为资源开发、环境保护、区域经济协调和持续发展提供系统的科学数据和信息服务。对地观测空间卫星子系统是由大型极轨组合平台和小卫星系列即多高度、多种轨道卫星组合成的观测体系。从资源与环境监测需要的角度来看，卫星发展的重点包括能连续提供高质量的观测数据、具长寿命的观测技术、以定量化为目标的超多波段成像光谱技术、不受云层影响的微波传感器技术、以海洋和大气为主要对象的探测器技术和能在全球空间、全天候、全时域进行连续、快速和高精度导航定位的全球定位系统技术。

A. V. Perisov（1998）认为 21 世纪遥感技术有如下两个发展方向：

（1）在遥感数据处理子系统中，多波段雷达系统因其不受气候条件限制，故得到迅速发展；热红外遥感系统的空间分辨率和温度分辨率将得到提高，从而可以探测深层的地下构造。光谱仪和扫描仪的分辨率已达极限，但仍将用于植被覆盖区研究。

（2）在遥感数据解译子系统中，计算机专家系统将逐渐发展起来。高速度、高精度、大容量遥感数据处理系统的建设是 21 世纪遥感技术发展中的另一重要问题。由于在资源与环境动态监测中要查清的季度和年度变化的数值很小，因而对精度的要求很高，一般应稳定在 90%～95%。同时，空间遥感技术的发展将导致传感器空间分辨率和光谱分辨率等的大幅度提高，从而使卫星图像的数据量和计算机处理运算量大幅度增加。在这方面，神经网络计算机和专家系统将对高速度、大容量遥感与地理信息系统数据处理系统的建设提供强有力的支持。采用神经网络，可利用其全并行处理、自适应学习和联想功能等特点，解决计算机视觉、模式识别等特大数据量和信息特别复杂的问题。

此外，作为星载成像雷达的有力支持系统，部分主动式机载微波系统具有更强的资源勘察潜力。美国的机载留米奈克斯系统（紫外光源激发）能检测出与 W、Mo、Zn、Au 和 U 等矿床相伴生的荧光性矿物的分布。表 5.1 列出了部分星载成像雷达系统的相关数据[1]。

表 5.1　部分星载成像雷达系统

星载成像雷达	国　家	发射时间	基　本　参　数
ERS-1 SAR	欧空局	1991	轨道高度：785 km，轨道倾角：98.5°，极化方式：VV，俯角：23°，频率：5.3GHz，空间分辨率：26 m，辐射分辨率：1.70（1.79）dB，成像幅宽：99.6 km，每天绕地球 14.3 圈。

[1] 吴其斌，崔霖沛．1998．近年来勘察地球物理的现状与发展．见：中国地质矿产信息研究院编．跨世纪的地学态势——调查与科技．

续表

星载成像雷达	国　家	发射时间	基　本　参　数
JERS-1 SAR	日本	1992	波段：L，极化方式：HH，空间分辨率：18 m×18 m，成像幅宽：75 km，每天绕地球 15 圈。
ALMAZ SAR	原苏联	1991	轨道高度：300 km，俯角：30°～60°，波长：10 cm，极化方式：HH，距离及方位分辨率：15～30 m，辐射分辨率：3～5 dB。
航天飞机 SIR-C	美国	1994（两次）	轨道高度：225 km，轨道倾角：57°，工作波段：X、L、C，俯角：15°～55°，极化方式：HH、HV、VV、VH（L，C）及 HH、HV（X），距离分辨率：10～60 m，方位分辨率：30 m。
RADARSAT-1 SAR	加拿大	1995	轨道高度：789 km，频率：5.3 GHz，极化方式：HH，共有 5 种波束工作模式，俯角：20°～59°，空间分辨率：10～100 m，幅宽 45～500 km。
ERS-2 SAR	欧空局	1995	轨道高度：787 km，倾角：98.5°，周期：100.6 min，重复周期：35 d，成像波长：5.7 cm，极化方式：VV，幅宽：100 km，分辨率：30 m，探视角：23°。
EOS（A）SAR	美国	1998	轨道高度：620 km，极化方式：HH、HV、VV、VH（L）及 HH、VV（C，X），俯角：15°～50°，幅宽：30～50 km（局部制图）、100～200 km（区域制图）及 350～500 km（全球制图），3 种成像模式的空间分辨率分别为：20～30 m、50～100 m 和 250～500 m。

5.1.2　地理信息系统

地理信息系统（GIS）出现于 20 世纪 60 年代。它作为地学领域专家的有力工具受到越来越普遍的关注，开始在多个领域得到应用。

GIS 是对地球空间数据进行采集、存储、检索、分析、建模和表示的计算机系统。它不仅可以管理数字和文字（属性）信息，而且可以管理空间信息（图形），并能提供各种空间分析的方法，对多种不同的空间信息进行综合分析解释，解决空间实体之间的相互关系，分析在一定地理区域内发生的各种现象和过程。GIS 为地质学家提供了在计算机辅助下对地质、地理、地球物理、地球化学和遥感等多源信息进行综合分析和解释的有力工具。由于 GIS 具有交互式处理能力和快速运算能力，通过反复尝试，使地质学家能够比较容易地完善自己的知识模型。

GIS 按其研究开发的目的可以分为国家基础地理信息系统、城市地理信息系统和企业地理信息系统等等；按其研究开发针对的范围可分为全球的、区域的和局部的地理信息系统；按其时空模型可分为二维（位置模型）、三维（位置模型＋数字高程模型）和四维（三维＋时间模型）地理信息系统或动态地理信息系统。

除了软件和硬件外，数据是地理信息系统的关键。GIS 获取数据的主要手段有 GPS（Global Positioning System：全球定位系统）、DTS（数字全站仪）、DPS（数字摄影测量系统）和 RS（遥感技术）。

GIS 于 20 世纪 80 年代中期开始在地学界得到应用。美国地质调查局在 1985 年建立了 GIS 实验室，鼓励专业人员应用新技术。仅仅几年时间在基础地质、环境与灾害、矿产资源评价和区域地质调查方面的信息管理项目即达几十个。

GIS 在地学中的应用前景很广。信息经 GIS 分析处理，可绘出用常规测绘难以到达的地区如戈壁、沙漠、高原、雪山等的地形图。目前 GIS 在地学中的应用主要包括：

（1）地质找矿及矿产资源预测评价

德国发射的 SPOT 卫星主要用于石油、天然气及其他矿产的调查。它可对地貌进行立体观测，产生高分辨率、高精度的图像。使用该图像，在前期勘探阶段能准确、迅速查明地形、地表露头、岩性组合和覆盖区地下构造的基本形态。

（2）国土资源管理

我国于 1990 年利用 GIS 建立了 1∶100 万全国国土资源信息系统和 1∶400 万全国自然资源综合开发决策信息系统及某些省、市、县的国土规划与管理信息系统，用于国家与区域的经济建设和规划。

（3）自然灾害的评估与防治

我国于 1990 年建立了洪水险情预报系统。在 1991 年我国江淮地区发生的特大洪灾和 1994 年闽江和珠江流域等地发生的大洪灾中，太湖流域的 1∶25 万 GIS 信息系统和 1∶20 万 GIS 土地规划信息库结合遥感图像分别对洪水进行了监测，对灾情进行了准确的评估，使洪灾损失降到了最低限度。日本应用 GIS 分析 1995 年大阪神户地震引起的滑坡也是一个突出的例子。

在抗震设防区划和抗震防灾规划方面，利用 GIS 编制的抗震防灾规划具有应用方便、资料实用性强和能够实现资源共享等特点。

（4）建立地学信息库和编制地学图件

目前，不少国家，如美国、德国、法国、加拿大和中国等均已利用 GIS 进行了这方面工作。

5.1.3 遥感技术、地理信息系统和全球定位系统的一体化

地理信息系统需要应用遥感资料更新数据；遥感影像的识别需要在地理信息系统的支持下改善其精度并在数学模型中得到应用。但是目前由于受卫星分辨率和识别技术的限制，遥感图像计算机识别的精度还不能满足更新较大比例尺专题图的需要；遥感图像与常用的地理信息系统的不同的数据结构也妨碍了数据间的传输。在未来的发展中，新一代卫星影像的分辨率将有大幅度提高，计算机识别精度也将有明显改善。同时，从遥感图像具有的栅格数据结构向地理信息系统常用的矢量数据结构的转换也已取得明显进展。因此，遥感技术与地理信息系统的一体化已经为期不远。

遥感技术（RS）、地理信息系统（GIS）和全球定位系统（GPS）一体化技术又称 3S 技术。美国用于全球定位系统的 24 颗卫星已于 1993 年 6 月最终全部发射成功。3S 技术将最终建成新型的地面三维信息和地理编码影像的实时或准实时获取与处理系统，形成快速、高精度的处理流程，对遥感技术的发展具有深远的意义。

5.2 地球物理技术

地球物理技术发展很快。近年来，微伽重力仪的出现使重力观测精度从毫伽级（mGal $=10^{-5}$ m/s^2）提高到微伽级（μGal$=10^{-8}$ m/s^2）。光泵磁力仪的出现使磁力观测精度从 10 nT 提高到 10^{-2}nT。反射地震技术的提高尤为迅速。20 世纪 50 年代时，光点地震仪的动态范围为 25 dB；60 年代模拟磁带记录的动态范围提高到 45 dB 左右；70 年代数字磁带记录的动态范围达到 120 dB；80 年代以来，数字磁带记录仪器的发展则主要体现在地震记录道的极大扩展，即从 70 年代的 48 道和 96 道扩展到 1024 道和 2048 道，从而为三维地震观测提供了方便，提高了效率，并降低了成本。与此同时，在天然地震研究中出现了宽频带、大动态范围的三分量数字地震仪。90 年代初期，三分量数字地震仪采用了大规模集成电路，既可以利用天然地震，又可利用人工震源在预定地区进行三维地震观测；不仅能观测纵波（P）、横波（S）和转换波（PS）等体波，也能观测瑞利（Rayleigh）波和乐甫（Love）波等面波，从而极大地扩展了地震方法的应用范围及其解决地球内部三维结构问题的能力（刘光鼎，1995）。

5.2.1 区域地球物理研究技术

20 世纪 70 年代以前，人们主要是利用折射地震、波速分析、重力及电磁等方法研究地球内部的主要界面。70 年代后期，美国率先执行大陆反射剖面合作计划（COCORP），开始试验利用人工反射地震技术揭示地壳的精细结构，并在阿巴拉契亚等地取得了可喜的成果。80 年代，COCORP 技术发展成熟，逐渐成为岩石圈深部探测的主要手段之一。80 年代后期，层析成像技术由开发转向应用，它与高压物性改进的卫星大地测量技术和长波长动力场技术等一系列技术极大地促进了人们对地幔乃至地核的认识。90 年代，随着岩石圈研究逐步转向地球深部的综合研究以及由岩石圈结构、构造研究转向形成过程和动力学研究，地震层析技术、深地震反射技术和大陆科学钻探技术日渐兴盛（刘福田、白星碧，1995）。

1）地震方法

地震学是以观测为主要手段的物理科学。百余年来的发展史表明，地震学领域中的许多重大突破几乎都是来自对地震观测资料的正确解释。20 世纪 60～70 年代，人们借助地震方法能够清楚地识别出板块构造的基本轮廓；70～80 年代，由于地震台网的进一步发展，人们清楚地识别出了板块的轮廓；80 年代以来，微电子技术、现代通信技术和计算机技术在地震学中得到日益广泛的应用。由此发展起来的宽频带数字地震观测台网能够比较真实而无遗漏地记录地震时地面运动的全部信息。80 年代后期，随着数字地震观测台网和高分辨率流动台网的进一步兴起，人们用地震方法基本上可以识别更精细的地下结构和更详细的地震震源破裂过程。数字地震观测资料的使用使地震学家对地震记录的解释由辨认单个的地震震相发展到对整个波形的解释。

在大陆动力学的研究方面，为了了解地壳内部构造和精细结构，人们采用了高灵敏度地震仪器分析和多道反射地震剖面测量。由地震学联合研究机构（IRIS：Incorporated Research Institutions for Seismology）开发的 PASSCAL 可移动式数据记录仪是可在 100～1000 km 尺度范围内对地壳和上地幔进行成像研究的基本设备。记录仪采用三分量记录，可以提供震源的精确位置、源地的动力学和运动学参数、活动地区的几何形态以及物理特性

的层析确定等信息。

地球深部构造的地震研究在地球科学的发展中占有重要地位。它涉及到地震“孕育”的深部介质环境和资源（特别是油气）的分布与潜力等问题。对于地球深部精细结构、状态、断裂的形态与展布及其深层过程的研究，地震宽角反射、折射和近垂直反射波法具有极为重要的作用。这方面是重力、大地电磁测深和地震层析成像所不及的。

与此同时，人们还把注意力投向俯冲带的地震“孕育”特征。研究结果表明，地壳低速层、高角度断裂和浅部推覆以及深部岩浆活动可能与地震的“孕育”、发生和发展有着密切的关系。

在地球物理剖面与断面的综合研究特别是探讨地震区的深部构造背景、拆离构造、深部物质的上涌及其通道，以及壳内断裂特别是中、上地壳中的滑脱构造和位于中、下地壳中并伸达上地幔顶部的高角度深部断裂方面，宽角反射和折射对分辨地壳与地幔中的低速层和高速层具有独特的作用。这方面的研究表明，地壳不仅成层、块结构，而且在纵向和横向上都是不均匀的。

在利用地震方法研究大地构造方面，人们在地盾区、盆地区、大陆边缘、火山区、俯冲带和海域等地区均取得了新的进展，如波罗的地盾、堪察加火山带、青藏高原、中国大陆东缘、格尔木—额济纳旗、萨哈林、印度和中国西北的盆地区和波罗的海等。俄罗斯科学家对萨哈林及其邻近地区的深部地震折射资料用新的二维反演方法进行了重新解释。其结果证实在该区有活动的俯冲带和海洋板块的残余和遗迹存在。中国科学家通过人工源地震和天然地震对青藏高原特别是喜马拉雅造山带地区的岩石圈进行了大量研究，取得了重要进展。

（1）数字地震观测台网

70年代后期以来，数字地震观测台网的建设得到了愈来愈多的重视。日本从70年代起大约用了两个五年计划完成了区域地震观测网和国家级地震台网的数字化改造。德国在70年代建立了世界上最早的宽频带数字地震台阵。美国已将15个世界标准地震台改造成数字化记录，并筹建了全球数字地震台网（GDSN）和全球超长周期加速度观测台网（IDA）。80年代以来，数字地震观测与研究得到了更大重视。美国设立了将耗费巨资发展数字地震台网和台阵的地震学联合研究机构（IRIS）。法国建成了全球长周期数字地震台网（GEOSCOPE），并提出了以数字流动台阵为主体的岩石层透镜计划（LITHOSCOPE）。日本提出了建立环太平洋及俯冲带观测的数字地震观测和流动台阵计划（POSEIDON）。欧洲13国联合提出的地震观测与研究机构科学计划（ORFEUS）亦以地震观测为核心。同时，国际大地测量学与地球物理学联合会（IUGG：International Union of Geodesy and Geophysics）于1986年成立了世界数字地震台网联合会（FDSN），进一步推进数字地震观测和研究的联合与发展。

（2）地震层析技术

地震层析技术（CT：Computerized Tomography）是以先进的数字地震台网为基础的当代深部地球探测的前沿技术。本世纪70年代以前，地震台网很难用于地震层析研究。数字台网的飞速发展促进了层析技术在地球科学中的广泛应用，美国、欧洲和日本等纷纷建立了数字化台网。到目前为止，已经建成全球数字地震台网（GDSN）和许多局域网。有关方面的研究包括三维体波速度成像、V_P/V_S和衰减成像以及成像反演等。三维体波速度成像

研究不仅揭示了从地幔顶部直到核-幔边界（CMB）的速度结构，发现了CMB附近大的速度扰动和地幔对流型式，而且在一些洋中脊、俯冲带、转换断层、大陆裂谷带、震源区和火山地热区所进行的较大比例尺的成像研究也取得了重要成果，如大陆根和热点的分布等，极大地冲击着地球科学的许多领域。地震层析技术可以给人们带来地球内部总体速度结构的认识，给密度和流体变形提供重要约束，从而揭示地球这一巨型热机机制方面的信息。在岩石圈研究中，地震层析成像已经成为获取深部结构、构造及演化信息的重要途径。在矿产普查勘探方面，这一技术已在寻找隐伏矿床中发挥积极作用。盆地地区的波速 V_P/V_S 三维成像在油气勘查中具有强大的生命力。三维地震成像在研究板内地震、消减带地震和火山地震方面具有特殊意义，可以为解决地震成因、地震预测及减灾等提供重要信息。三维地震成像技术的关键，对三维地震勘探成像技术来说，主要是研制960道接收设备和数据处理的软硬件；对三维地震层析成像技术来说，主要是研制三分量数字地震仪。地震层析技术目前已成为海洋国土和专属经济区划界和海洋油气资源开发的关键技术。随着宽频数字化可移动式地震仪的发展和全球数字地震台网的建立，未来的地震层析技术可以对地幔和软流圈进行实时监测，因而具有广阔的应用前景。

（3）人工深反射地震技术

为了能够获取地壳上部10 km内沉积盆地和复杂构造的精确成像，在过去几十年里发展起来的人工深反射地震技术已成为探测岩石圈内部结构的重要手段。自1973年美国开始实施大陆反射剖面合作计划（COCORP）以来，深地震反射技术已经成熟。深地震反射法由康乃尔大学的Oliver在70年代中期提出。该项技术的应用揭示了岩石圈上部的精细结构、组成及演化细节，在很大程度上改变了人们以前对地壳和岩石圈地幔的传统认识。例如，否定了地壳以康氏面为界的双层模式，指出地壳实际上具复杂的不连续的多层结构。其中有的已发生过多期变形与位移。目前，深地震反射技术已是研究碰撞构造、裂谷构造、大型逆冲构造、盆地基底构造和埋藏构造等的有效手段。继美国大陆反射剖面合作计划之后，英国的不列颠反射剖面联合研究机构（BIRPIS）、法国研究大陆和海洋地壳的反射和折射机构（ECORS）、德国的大陆反射地震计划（DEKORP）和加拿大的岩石圈探测计划（LITHOPROBE）都成功地解决了造山带、裂谷带和板块缝合带研究中的一些重大问题。中国也已在喜马拉雅和大别山等地开展了这方面的工作，研究深部构造、断层、莫霍面和上地幔地层，最大深度达178 km。

人工折射地震研究长期以来已在地球深部探测中广泛使用。它可以提供地壳的速度结构信息，是人工地震反射和层析研究的基础。

2）地壳与地幔的电磁性质研究方法

目前在深10～20 km的所有研究和浅层矿产的勘探中广泛使用的方法主要是各种电磁方法，其中大部分采用人工场源。但在地球深部探测中主要利用天然电磁场即大地电磁剖面测深。在过去的150多年中已经在一天到100年或更长时间内对地磁场随时间的变化进行了长期连续观测。目前这方面的工作有中国大陆地区地壳与地幔的地电特性研究、巴颜喀拉山东部及其邻区大地电磁测深的地质解释、华北北部MT测线数据的二维反演和中国下扬子及其邻区的MT测深等。

5.2.2 勘探地球物理方法

随着地质找矿工作的不断深入，许多产在地表和近地表的矿床已被发现，因此迫使人

们必须依靠新的科学技术来寻找隐伏矿。过去常用的地球物理探矿方法有磁法、电法、重力法、放射性测量法和地震法等。近年来，在所采用的方法中，特别重视了探测深度大的各种物探方法，其中包括航空物探、地面物探和井中物探三大类。

1）航空地球物理勘探技术

（1）航空磁测

航空磁测是航空物探中最老的一种方法。由于电子技术、计算机技术和航空导航定位技术的发展，航空磁测目前仍然保持着旺盛的生命力和良好的前景。目前的航空磁测观测仪器由于采用了量子学原理的核旋和光泵磁力仪，其分辨率已提高到 0.01 nT，甚至达到 pT 级，仪器采样率也达到 10 次/s。

（2）航空电磁测量

航空电磁测量分频率域和时间域电磁测量两类。频率域电磁测量（FEM）的发展主要是采用多装置和多频率以提高方法的解释和分辨率；时间域电磁测量（TEM）为提高解释效果往往安装三组正交线圈。

传统的航空电磁法（AEM）在找矿方面曾经取得卓越的成效。其主要障碍是在寻找地表有良导性覆盖埋深百米以下的矿床时受到很大限制。据此，人们加强了大探测深度电磁系统的研究。主要途径一是提高发射功率和数据的现场处理能力，二是改变发射源的位置，即将发射机置于地面，研究新型的定源航空电磁系统。

（3）航空放射性（伽马能谱）测量

目前航空放射性测量已不仅仅是测量伽马射线总强度，而是进行伽马射线能谱测量，测量的谱道多达 2048 道。同时还开发了多种航空伽马能谱测量的处理软件，如宇宙射线、放射性时间、背景辐射、康普顿效应剥离、灵敏度和高度改正，以及求比值和 F 参数等进行各种滤波的软件。

（4）航空重力测量

由于把重力仪安装在飞机上观测时飞机的运动会严重改变观测的重力值，因此航空重力测量长期未能实现。与其他航空物探方法相比，航空重力测量的难度要大得多。但随着 GPS 技术、航空定位技术和计算机技术的迅速发展，航空重力测量也得到了进一步发展。人们把地面的重力仪安装在飞机上，利用单定位技术可求得各方向的加速度及其状态。通过软件可较精确地计算出飞机运动对重力观测值的影响并进行改正，以求得观测点的相对重力值。

2）地面物探方法

在地面物探方法方面，时间域电磁法（TEM）近年来有了很大发展。与直流电法和频率域电磁系统相比，时间域电磁系统的探测深度明显要大，垂直分辨率也高，易于探测到低阻覆盖下的良导矿体。地面电磁法的发展有两个显著特点：一是向轻便化、适用于矿产普查的天然场电磁法方向发展；二是向多功能方向发展，即一台电磁系统既能做直流电阻率、频率域和时间域激发极化法，又可做瞬变电磁法和天然场电磁法等❶。

80 年代以来，加拿大和澳大利亚利用地面 TEM 发现了一系列隐伏矿，如赫利尔、埃

❶ 吴其斌，崔霖沛.1998. 近年来勘察地球物理的现状与发展. 见：中国地质矿产信息研究院编. 跨世纪的地学态势——调查与科技.

洛伊斯、贝纳姆布拉和阿萨巴斯卡等。利用 TEM 法在中国寻找隐伏块状硫化物矿床中亦取得了良好效果。如在新疆阿尔泰南缘多金属成矿带的克因布拉克、铁木尔特和可可塔勒等矿床上，用 TEM 开展深部找矿，根据其结果布置钻孔，其见矿率很高。

金属矿地震方法在一些国家已发展起来。主要用于探测层状沉积矿床和与岩浆作用有关的矿床的构造填图和研究探矿要素。俄罗斯已出版了一套金属矿地震图册。加拿大和澳大利亚近年来也投入了较大的工作量，取得了实效。

原苏联研制开发的一系列地电化学方法，如元素存在形式法（MPF）、热磁地球化学法（TMGM）、部分提取金属法（CHIM）等，具有分辨率较高，探测深度大的特点，可直接用来寻找隐伏矿床。据报道，这些方法可在厚覆盖层（厚度达 150 m）和厚基岩（厚度达 500 m）条件下寻找深埋的隐伏矿，且受矿床类型、覆盖层厚度、成分、物理和化学性质的影响较小。这 3 种方法在原苏联已得到普遍推广和运用，取得了较好的找矿效果。近年来西方国家也开始注意这些方法。

3）井中物探方法

井中物探方法除了可获得井壁地质信息外，更主要的是可获得井壁四周和钻孔底部的信息，对发现井旁和井底的盲矿极为重要。井中物探方法主要有井中磁测法、无线电波法、井中激电法和井中充电法等，以井中脉冲电磁法在西方国家采用较多且找矿效果较佳。井中瞬变电磁法（DHTEM）的分辨率高，横向探测距离大（可达 200～300 m），特别适合于探测深部良导盲矿床。加拿大在勘查中使用了一种称之为 UTEM 的系统，能在深达 3000 m 处探测到距钻孔 300 m 以上的大良导体。加拿大近十多年来所发现的贱金属矿床，如温斯顿湖锌铜矿（埋深 300 m）、奥尔里索西斯铜锌矿（埋深 600 m）、林兹里铜镍矿（埋深 1280 m）和维克多铜镍矿（埋深 2400 m）等绝大多数都是盲矿矿床，几乎均是借助钻孔和井中物探方法发现的。在澳大利亚、北欧、原苏联和美国等国家和地区也屡有利用井中物探方法取得找矿成功的报道。

5.2.3 勘探地球物理方法应用

1）石油与天然气勘查的非常规物探方法

（1）高精度航磁和土壤磁性测量

用高精度磁测可以解决划分区域构造和确定断裂等问题，目前正向着解决局部构造、分层研究甚至用以直接寻找油气方向发展。中国近年来在大庆、胜利、辽河等油田进行的 1：5 万高精度详查所圈定的构造，大多数被地震或其他勘探手段所证实，有的已打出了工业油流。

美国在十几年前开始在许多已知油田上进行低空微磁测量。为了消除某些干扰还采用了航空水平梯度测量。由此发现在许多油田上方存在波长短、幅度低（通常为 10 nT）的局部异常。这些微磁异常与油气渗漏形成的蚀变带的符合率高达 96%，与油气田的符合率亦达 64%。

土壤磁性测量在一定程度上可直接用于寻找油气。根据美国 1026 口井的磁化率数据统计发现，80%～85%的油气井有磁化率异常，而 85%～90%的干井没有磁化率异常。

（2）大功率瞬变电磁法（建立场法）

在原苏联的许多油气田中大功率瞬变电磁法的工作量约占电法勘探工作量的 70%。该方法工效高，探测深度大（达 8 km）。近年来，该法又吸收了地震方法的许多优点，逐渐采

用高精度排列式密集布点的拟地震采集方式，在资料处理中也使用了叠加、偏移、差分等一系列手段，从而使钻探成功率达到67%。

(3) 放射性方法

油气的放射性勘探方法主要包括航空和地面 γ 能谱测量和 α 测量。

在美国，根据"全国铀矿资源评价计划"，利用航空 γ 能谱测量 6 个州的 706 个已知油气田，72.7% 的油田有归一化的钾异常和铀异常。在澳大利亚的 3 个油气区内，在用放射性方法预测的有利地区打的 30 口井中有 18 口产油或有油藏，成功率为 60%；而在有利地区之外打的 39 口井中只有 9 口产油或有油藏，成功率为 23.1%。

在利用放射性方法寻找新油田方面，在美国保德河盆地发现放射性异常 221 个，在已验证的 87 个异常中，有 56 个产油，占 64.4%；在原苏联和中国也有类似例子（吴其斌，1996）。

2) 油藏地球物理勘探方法

现行的石油开采方式对石油资源造成极大浪费。美国能源部 1986 年的调查表明，当从经济上认为某一油藏已经枯竭时，实际上仍有 60%～70%的可动油留在储层中。世界上大部分重油迄今尚未开采。只要了解了油藏内部结构并采取适当措施，就能大幅度提高开采量。为此，自 20 世纪 80 年代以来，地球物理界出现了一股油藏地球物理热。除原有物探技术如三维地震、垂直地震剖面（VSP）、振幅随偏移距变化（AVO）的广泛应用和发展外，井间地震、矢量地震和四维地震等新技术也应运而生并得到发展。从而形成了应用地球物理学的一个新分支——油藏地球物理，亦称储层地球物理。它的目的主要是研究已知油藏的内部结构、储集特征、流动特性及一切影响开采的因素。

(1) 高分辨率三维地震

三维地震测量的特点是进行密集的空间采样。在勘探阶段，它的缺点是费用太高。然而在油藏开发开采阶段，三维地震测量与相应的控制井或探边井相比，经济上仍要合算得多。因此三维地震很快在油藏的开发和开采中得到广泛应用。近年来，在这方面有两点明显的技术进步。一是在地震正反演理论的研究中十分注意地震反射特征与储层参数之间的联系，如地震振幅、反射强度、层速度等与储层岩性、孔隙度、含油气饱和度甚至渗透率之间的关系；二是广泛采用了高分辨率的数据采集处理方法和人机联作资料解释方法。

(2) 三分量 VSP 与逆 VSP

在油藏的描述和评价中，VSP（垂直地震剖面）技术仍然是一种有用的手段。除利用常规 VSP 研究井孔附近的构造和地层外，在这方面目前主要有两方面显著进展。一是利用三分量 VSP 给出的横波偏转和横波分裂信息研究储层的不均匀性和方位各向异性。这种方法对于描述裂缝性油藏或识别裂缝中的油藏尤为重要。二是将 VSP 测量与三维地震相结合，以改善油藏填图精度。逆 VSP 数据较适合层析成像处理。逆 VSP 与三分量 VSP 一起已成为油藏地球物理研究的重要研究领域之一。

(3) 振幅随偏移距变化

振幅随偏移距变化（AVO）分析技术是识别气藏和预测岩性横向变化的有效手段，近年来已得到广泛应用。其中三分量 AVO 是一个新的研究领域。在理论上，只有三分量数据的 AVO 分析才是对真振幅随偏移距变化趋势的分析。三分量 AVO 分析不仅能进行横向岩性预测，而且在确定油藏中流体的类型及其分布方面很有潜力。

（4）井间地震

井间地震目前还处于试验和试生产阶段。它是油藏非均匀性测量的关键技术。它的特点是不仅分辨率高而且适用性强，几乎能满足油藏工程的各种需要。但缺点是其横向探测范围受到限制，层析成像的效果不很理想，对井距、井孔及设备的要求苛刻。

（5）矢量地震

矢量地震是地震勘探的发展方向。用矢量地震探测油藏中的地震各向异性具有重大的意义。它可以了解裂缝的方位和密集程度。记录矢量波场的主要目的在于有效地解决油藏的描述和模拟问题，为提高采油率服务。

（6）四维地震

四维地震亦称时间推移地震（time lapse seismic），实际上是三维地震的重复观测，主要用于开采后期的强化采油阶段（高林，1991）。

3）深部控矿构造的地球物理调查

深部控矿构造的地球物理调查方法主要包括地震反射法和探测深度较大的一些地面电磁法（CSAMT、TEM）以及高精度重磁测量（吴其斌，1996）。

以地震为主的弹性波方法技术仍列各种方法之首，其应用领域也不断扩大，不仅应用于金属矿，也应用于环境和工程等领域。与此同时，多种物探方法的综合应用愈益成为人们普遍注意的方法。随着计算机技术广泛引入和一些更为精细的数学工具的应用，地球物理资料的解释水平得到大幅度提高。如果说，物探仪器设备更多地依赖一个国家的工业技术水平，那么，对物探资料解释技术的提高则与物探人员的智力劳动和计算机技术的普及程度关系更为密切。后者主要反映在近年来一些发展中国家如中国、尼日利亚、伊朗、印度和菲律宾等的有关研究中。

多信息综合研究意识的明显提高是另一突出特点。在这方面有单一方法的多参数多分量多信息采集（如全波反演及阵列观测与解释），多方法的综合勘查技术（如重磁电、重磁震、井-地、地-坑道等多方法、多方位的观测和解释等）。这些是为实现以地理信息系统为支撑的地学多元信息的综合采集和解释所必不可少的。

5.3 地球化学研究技术

地球化学调查目前最显著的特点是从区域性地球化学填图发展为全球性地球化学填图，从研究局部的地球化学异常模式发展为研究全球性的地球化学模式。

5.3.1 国际地球化学填图及全球地球化学数据库

早在20世纪60年代人们就开始注意到地球化学填图的重要意义。1970年，北爱尔兰地球化学试验图集问世。之后，德国、瑞典和芬兰等国相继出版了全国性地球化学图集。国际地球化学填图于1988年正式列入国际地质对比计划。在全球地球化学填图中，目前最急需解决的问题是填图方法的标准化问题。例如，区域地球化学勘查及区域地球化学填图目前约覆盖了全球面积的10%，但其中没有一种元素是共同测定的。为此人们提出了要建立全球参考网，使样品能均匀地分布在全球大陆表面。为实用起见，参考网的起点设在赤道上，以纬度1 1/20（大约166 km）间距划分，构成160 km×160 km的取样网格。除全球

参考网以外，取样介质和样品的时代问题也是目前正在研究的问题[1]。

从社会角度来看，许多国家目前正在纷纷立法来规定环境中化学物质可容忍的安全水平。但由于自然界的地球化学背景本身是不一样的，因此需要进行地球化学填图来配合环境立法。欧洲地质调查所论坛（FOREGS）的 33 个国家正在商议联合按照 IGCP259 项目的规定在欧洲进行极低密度的地球化学填图。

在第 30 届国际地质大会上成杭新报告了中国在全国采集 500 余个泛滥平原沉积物样品所制作的地球化学图，与根据 1∶100 万以上的水系沉积物样品分析结果所制作的地球化学图在宏观上极为相似，这是进行全球极低密度地球化学填图的一种尝试。据 P. V. Koval 报告，俄罗斯在西伯利亚贝加尔地区进行了每 100 km^2 一个样的地球化学填图试点。所采样品包括水系沉积物、地表水、土壤和岩石，在某些剖面及基准点上还采集了雪、树木和苔藓等样品。样品用 XRF（X 射线荧光光谱），AAS（原子吸收光谱）及 AES（原子发射光谱）进行了分析，制作了数百份图件。王学求报告了在隐伏区的超低密度地球化学填图，所采用密度为 60～800 km^2 一个点。结果在某些大型超大型矿床周围发现了规模极大且清晰的多元素异常。W. De Vos 在比利时与卢森堡进行了航空放射性与磁法测量。测量结果，钾的地球化学图与地表地质极为一致，而 U 和 Th 则透露不少深部岩石信息。迟清华等对华北地台地壳的化学元素丰度进行了测量。在华北地台 1.8 km×106 km 范围内采集了 12000 个各种类型岩石样品，取得了 75 种元素的 1200 种组合样的分析数据。根据地球物理、地质及地球化学资料建立了地壳模型，并分别给出了沉积层、上地壳、中地壳和下地壳的元素丰度。

5.3.2 石油与天然气地球化学研究

近几十年来，对于石油与天然气化探方法技术的研究主要集中在如下方面：烃类气体的垂向迁移机制。人们提出了扩散、渗透逸散、微气泡等多种微渗逸机制。近年来，又提出了盐析作用和水迁移机制等新的机制。然而，这些迁移机制的研究目前还主要是为实测现象的解释提供理论依据和思路，很难具体说明观测结果和指导方法的研制与改进。因此，有人认为，重要的是要捕捉到油气藏渗透的确实证据。然而，影响油气化探效果的不仅有观测方法本身，而且还有测区的地质—景观条件。因此，还应特别注意研究测区的地质—景观地球化学条件。L. C. Price 曾指出构造运动活跃区或稳定区对近地表的油气化探测量结果和解释有很大影响。M. A. Abrams 提出存在着活跃的和钝态的两类微渗逸区。在钝态渗逸区内近地表采样不能查明烃类的微渗逸异常[2]。

在第 30 届国际地质大会上，E. Faber 报告了沉积物、水体和大气甲烷的碳同位素示踪。在塔里木盆地的气源对比中，蒋助生将热模拟实验应用于该盆地的气源对比，以确定沉积环境、原始有机质的分子结构和成熟度等与天然气组分的关系。

5.3.3 固体矿产地球化学勘查

1）区域地球化学异常评价

区域地球化学异常评价是矿产普查的重要手段。20 世纪 90 年代初，人们已注意到在区

---

[1] 施俊法，吴传璧．1998．九十年代勘察地球化学进展与展望．见：中国地质矿产信息研究院编．跨世纪的地学态势——调查与科技．

[2] 吴传璧．1996．油气化探：战略与方法论．见：中国地质矿产信息研究院编．走向 21 世纪的地学与矿产资源．

域异常评价中，应当遵循从区域到局部的地球化学异常解释原则，重视从区域地球化学背景揭示控矿地质因素，以达到矿产预测和局部地球化学异常评价的目的。90年代中期，地球化学家们加强了区域地球化学异常模式和地球化学场的研究。

在地球化学异常解释中，空间信息技术的应用具有重要作用。其中包括空间图形信息技术即地理信息系统和地质统计学两方面。这两种技术的综合应用使地球化学异常解释技术提高到一个新水平。地理信息系统数据库由大量的空间图层组成。地球化学数据是一种典型的具空间特征的数据。不同元素可构成不同层面。使用地理信息系统可以将地球化学数据与地质、地球物理数据构成不同层面叠合，进行多学科分析，圈定找矿靶区。地质统计学是处理空间数字信息的技术。与传统的统计学方法不同，地质统计学注意观测点的空间关系，并发展了如变差函数和克里格法等自己的基本工具。

2）寻找盲矿的地球化学新方法新技术

所谓盲矿实际上分布在两类截然不同的地质环境——半裸露区和掩伏区。在半裸露区寻找盲矿，传统的地球化学方法仍然有效；而在掩伏区，90年代以来，有关的找矿方法已有了很大改进，主要表现在元素的检出限明显降低，加大了地球化学方法的探测深度。主要方法有❶：

（1）活动态金属离子法

活动态金属离子法（MMI：Mobile Metal Ion）是由 A. W. Mann 和 R. Birrell 在90年代发展起来的，是用一种或几种弱的金属试剂提取活动态的金属离子，主要分析 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Au、Ag 和 Pd 等。据称，用这种方法所获得的地球化学异常重现性较好，能探测 700 m 深的矿体。

（2）酶浸析法

该方法是 R. Clark 在80年代中期研制出来的。主要根据运积物土壤中非晶质所吸附的微量元素能反映深部基岩的地球化学特征进行探测。据称，这种方法在冰积物覆盖区尤为有效。

（3）地电化学法

地电化学法（CHIM）包括元素赋存形式法、热磁地球化学法、扩散提取法和部分金属提取法等，其核心是部分金属提取法，亦称电提取技术。元素赋存形式法、热磁地球化学法和扩散提取法又称偏提取技术。

（4）地气法、元素分子形式法和离子晕法

1982年，K. Kristiansson 和 L. Maqlmqvist 发现氡可以快速搬运到地表，其搬运时间不超过氡的半衰期 3.8d。他们由此假设氡原子可能是由一种地气流搬运的。携带氡原子的气体在地下水中以气泡形式存在，氡原子依附在气泡的气-水界面上。根据这一假说，K. Kristiansson 和 L. Maqlmqvist 于1984年在瑞典北部一已知矿床上方的雪片中发现了与矿床有关的成矿元素。此法称为地气法（GEOGAS）。

德国的 RULF GEO 公司和捷克地球物理研究所采用直接从大气中采集大气分析其中金属元素的含量，在矿化上方也观察到了金属元素的异常，将此法称为“元素分子形式

❶ 施俊法，吴传璧．1998．九十年代勘察地球化学进展与展望．见：中国地质矿产信息研究院编．跨世纪的地学态势——调查与科技．

法”（MFE：Molecular Form of Element）。

近年来俄罗斯学者 C. B. Grigolia 研制出在隐伏区找矿的新方法“离子晕法”，利用在大气圈近地表部分元素浓度偏高的现象寻找隐伏矿化。

J. C. van Moort 在澳大利亚北部干旱地区的巨厚风化壳中成功地用酸洗后的残余物为分析对象，消除了化学风化的叠加作用，获得了原生分散模式，可供在厚层风化壳地区开展此工作借鉴。

在分析技术方面，A. Pwa 等人将电子顺磁共振谱和质子探针 X 射线谱分析成功地运用于化探。该项技术分析结果准确，速度快，能同时进行多元素分析，且不破坏样品。

（5）地球气法（NAMEG）

谢学锦等人在 1990 年开始研究此法。他们认为深部气体以微气泡形式携带超微细颗粒金属达于地表可能不是局部的而是全球性的，并将其称为地球气（earth gas）。在各种尺度上分析这种地球气带至地表的分析方法称为地球气法。应用这种方法，他们已经在山东金矿、乌兹别克斯坦穆龙套金矿和澳大利亚奥林皮克坝铜-铀-金-银矿的战略性找矿中获得成功（谢学锦，1998）。

（6）离子测量系统

离子测量系统（IONEX）是由 Goldberg 提出的一个战略性深穿透方法系统。他将系统分为 6 个阶段缩小靶区，主要将 Antropova 的 MPF 方法与 CHIM 结合使用，用 MPF 方法作战略性及区域性测量，而用 CHIM 方法作详查。

（7）航空气体测量

航空气体测量包括航空汞蒸气测量、烃类气体测量和通过气溶胶测量尘埃中的某些金属粒子含量等方法。由于受气流等多种因素影响，这些方法的效果大都不很理想，目前还处于研究阶段。

5.3.4 同位素地球化学方法

20 世纪 90 年代以来，同位素地球化学无论在应用上还是方法上都得到了长足的发展。

在古气候研究方面，人们在利用碳同位素作为恢复古气候变化工具的同时，还用$^{87}Sr/^{86}Sr$ 同位素变化研究海洋碎屑沉积物所提供的古气候信息。为研究地球上水的成因与演化，对 D/H 进行了离子探针测定。

地球演化研究一直是同位素地质学研究的重要方面。近来，人们用 Sm-Nd 法对地球的早期和晚期分异进行了研究；用 ^{97}Tc-^{97}Mo 和 ^{182}Hf-^{182}W 年代测定研究地球的加积（Terrestrial accretion）和地核的形成时间；用地幔包体中氮丰度和同位素研究地幔及大气圈演化的意义。在区域地壳演化方面，不少研究者通过对花岗岩中 Nd 和 Pb 同位素研究了中国东南部地壳演化，用 Sm-Nd 模式年龄研究了巴西地盾的地壳演化等。

$^{40}Ar/^{39}Ar$ 测定有着广阔的发展前景。除岩石定年外，$^{40}Ar/^{39}Ar$ 还用于断层年代的测定。在方法上近来又发展了$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代的激光探针测定。

裂变径迹法在定年的基础上，目前发展了把裂变径迹方法用于填图及研究增生过程，以及分析地震断层附近的热异常等。

气体同位素特别是惰性气体同位素的研究近年来得到了迅速发展。在气体同位素研究方面如用氮同位素 $\delta^{15}N$ 研究花岗岩成因。在惰性气体研究方面，如用 He 研究 10^5 年范围内地下水的冷却，盐湖中的^{4}He、^{22}Ne 和^{36}Ar，岩石中的圈闭 He 和$^{3}He/^{4}He$，以及^{40}Ar 和$^{40}Ar/$

^{36}Ar，MORB 玻璃中氦、氖、氩的分馏等。在区域地球化学方面，有人研究了中国构造地球化学分区与惰性气体的关系；还有人分别对大别山榴辉岩的氦、氩和乌拉尔石英中的氩及氦同位素进行了研究。

宇宙成因^{10}Be、^{26}Al 和^{36}Cl 的研究近来得到了广泛的重视，有着广阔的发展前景。如用宇宙成因的^{10}Be、^{26}Al 和^{36}Cl 原位测定研究冰川发育历史，用石英中的^{10}Be 和^{26}Al 测定史前时期洞穴沉积的年龄，用宇宙成因的^{10}Be 和^{26}Al 的测定估算青藏高原剥蚀速度，以及通过岛弧火山岩中的^{10}Be 研究大洋沉积物带入岛弧岩浆岩的问题等。此外，^{14}C 和^{10}Be 的同位素亦用于气候变化研究。^{10}Be 还用于研究 M/G (Matusyama/Guass) 地磁倒转边界的变化。

Re-Os 体系是一个值得注意的方法。目前这方面的研究包括球粒陨石中的 Re-Os 体系、辉钼矿的 Re-Os 定年和黑色页岩中的 Re-Os 体系研究等。

除此以外，Ra、B 等同位素的研究也日益为人们所关注。有人认为湖泊中^{226}Ra 的行为研究是测定全新世沉积物年龄的一种潜在方法。还有人对岩浆及海底热液成矿系统中的硼同位素进行了研究。

在方法方面，近年来发展了用高精度等离子质谱测定$^{65}Cu/^{63}Cu$ 比值的天然变化；发展了热离子化质谱仪（TIMS：Thermal Ionization Mass spectromete）和加速器质谱仪（AMS），以及用热发光定年研究古地震和湖相沉积物的年龄等。

在第 30 届国际地质大会上，不少学者报道了基础地质研究中的同位素地球化学方法。其中主要有 J. Veizer 的锶同位素地层学研究，K. Konno 等对鱼牙齿化石的锶同位素研究，以及 M. Novak 对基岩-森林土-云杉冠-大气系统的硫同位素动力学研究。在环境的同位素地球化学研究方面，有洪阿实用海洋稳定同位素示踪对全球变化的研究，李浩对南中国海风成沉积的古环境意义的研究和魏克勤对中国季风区的 $\delta^{18}O$ 对古气候指示的研究。在同位素的地质测量新技术与新方法方面，G. Faure 在用宇宙成因核类（^{10}Be）研究南极石英暴露年龄方面取得了引人注意的成果。J. H. Chen 等用高精度热离子质谱测量了第四纪火山岩地磁漂移的^{238}U-^{230}Th 年龄。

5.4 大陆科学钻探技术

科学深孔和超深孔是通向地壳深部的通道，它使人们能直接、真实和客观地了解地球深部的情况，在地球科学研究中具有极为重要的意义。迄今为止所施工的许多科学钻探发现，凡是根据地球物理和地面地质所确定的深度超过 1500 m 的目标几乎均未得到钻探证实，这样便对地球物理探测结果的地质解释提出了严重挑战，也对地球科学界产生了巨大冲击。例如，原苏联所施工的三口超深井均未达到根据地球物理所确定的既定目标：科拉超深井不仅在预测的 7 km 深处未见到康拉德界面，而且直到 12 km 下的深处仍未见此界面；克里沃罗格超深井据地球物理资料应在 9～10 km 深处出现太古宙岩系，但钻探结果在 250 m 深处即进入太古宙斜长花岗岩；高加索的 Saatlin 超深钻孔据地球物理探测，该区缺乏花岗岩层，仅由沉积岩和玄武岩组成，玄武岩应出现在 7 km 深处，然而超深钻探发现，在 3.5 km 深处即出现中生代玄武岩夹少量安山岩，从 6000～8267 m 却出现了一套属于"花岗岩层"的中生代火山岩，等等（肖庆辉，1995）。

大陆科学钻探可分为浅钻、中深钻、深钻和超深钻 4 类：3000 m 以内属浅钻；3000～

6000 m 属中深钻；6000～9000 m 属深钻；9000 m 以下属超深钻。超深钻计划于 20 世纪 70 年代在原苏联开始实施。此后，美国、德国、法国、瑞典、捷克、奥地利、瑞士、加拿大、日本、墨西哥、英国、比利时、冰岛和塞浦路斯等 14 个国家相继开展了大陆科学钻探活动。原苏联已完成 18 个科学钻孔，其中科拉超深钻孔达 12262 m，是目前世界上最深的钻孔。德国的 KTB 超深孔终孔深 9100 m。美国已完成 13 个钻孔，最大孔深 3500 m。法国已完成 4 个中深孔。日本和我国也已开始这方面的工作。

5.4.1 超深孔钻探前沿技术

1）垂孔钻进

垂孔钻进钻孔倾斜是超深钻的普遍难题（表 5.2）。维持钻孔的垂直是超深孔成败的关键。原苏联在科拉半岛钻了 6 个斜孔后，摸索出了一套控制超深孔孔斜的方法。有两个或三个涡轮马达并在一起的钻进系统是一种有效的垂孔钻进系统。用这种钻进系统可获得 4000 m 孔深只偏斜 1°的好效果。德国在垂孔钻进中采用了两种能自动测斜和纠斜的自动导向钻进系统和一种能进行随钻测量的孔底马达导向钻进系统。采用这一系统，德国的 KTB 主孔在 1721.3 m 深处的顶角为 0.7°。

表 5.2 几个科学深孔和超深孔的孔斜情况

钻　　孔	深度/m	钻孔顶角/（°）
科拉 SG-3	12065	28
克里沃罗格 SG-4	3508	29
乌拉尔 SG-5	4008	20
Gravberg 一孔	6636	42
Gravberg 二孔	6600	45
KTB 先导孔	4000	10～28

2）钻井泥浆

地学和工程方面对超深孔泥浆具有特殊要求：①在高温（300℃）下泥浆的主要性能能基本保持稳定；②不影响地球化学分析；③具良好的流变性能；④无固相或低固相；⑤要考虑泥浆在高温下的物理化学特性对孔壁造成的不稳定性；⑥润滑性能良好；⑦有利于控制钻具腐蚀和环境保护。德国在 KTB 钻进中所使用的 Dehydril HT（一种纯人造矿物）水基泥浆系统能较好地满足上述要求，但其耐电解能力较差。

3）孔底马达驱动

孔底马达驱动是超深孔钻杆驱动的最佳方案。由于钻杆不旋转，因而减轻了钻杆磨损，改善了钻杆受力，从而允许采用强度低一些的轻合金钻杆，并有利于钻孔稳定和便于电缆进行随钻测量。螺杆马达能耐 150℃左右（相当于孔深 4.5 km）温度。涡轮马达能承受更高的温度。原苏联已将涡轮马达用于 210℃环境。美国使用涡轮马达的最高温度环境为 316℃。

4）超长钻杆

超深孔钻进对钻杆有特殊的要求。目前超深孔钻杆主要采用高强度的合金钢材。如 KTB 主孔采用 U—170（36CrNiMo-170）高强度低合金钢。原苏联在科拉 SG-3 钻进中采用

铝镁钛系轻质高强度钻杆（张伟，1993）。

5.4.2 科学钻探中的元素测井

元素测井又称地球化学测井。它是自然伽马能谱测井、中子活化测井、非弹性散射伽马能谱测井和热中子俘获伽马测井等的组合，以求取地层元素含量并转换成地层矿物丰度的方法的总称。

目前利用元素测井已可测定地层中的20余种化学元素。这些化学元素大多数集中在地层骨架中，对地质和岩石物性的解释有极强的诊断能力。人们据此可以精确计算出岩石骨架密度，并与体积密度一起计算出精确的总空隙度，据此划分地层和进行井与井之间的相关对比。这种方法比传统的测井曲线精确得多。德国大陆科学钻探计划（KTB）、国际大洋钻探计划（ODP）以及美国、法国、瑞典等国的大陆科学钻探计划的实践表明，元素测井对研究矿物在高温高压下蚀变所涉及的地球化学作用、弥补漏掉的岩屑或岩心样、显示岩石的不均匀性以及重建地球化学剖面等具有特殊的作用（李舟波、王祝文，1998）。

5.5 海洋探测技术

海洋占地球表面的近70%。海洋研究在地球科学研究中占有极其重要的位置。

5.5.1 海洋环境要素监测

20世纪70年代以来，人们相继发射了多种卫星进行海洋探测。其中包括美国的NOAA、LANDSAT、SEASATA-A、NIMBUS-7，欧洲航空航天局的ERS-1和日本的GMS、JERS-1卫星等，形成天基海洋监测。在这些卫星上装载有各种微波监测仪器、红外辐射计和海洋水色仪等，对海平面、海底地形地貌、波浪、风、水、流、海洋污染和初级生产力等进行监测。同时，还应用飞机、飞艇和热气球等作为空基监测平台。海气交换和大气环流监测主要是在海面和水下平台上设置的由各种传感器组成的监测系统进行的。

5.5.2 海底地形地貌测绘

海底地形地貌测绘技术从使用测深锤到利用回声测深并获取海水深度经历了几十年时间。在回声测深仪精度不断得到改善的同时出现了旁侧声纳（Side Scan Sonar）。旁侧声纳可以对回声测深迹线两侧一定宽度范围内的海底进行扫描。70年代中期，美国率先推出多波束测深声纳系统（Sea Beam），可以在声波发射张角44°范围内形成2°×2°的16个波束，其最大测深为11000 m。现在Sea Beam-2000的测深深度为50～11000 m，最大工作扇面150°，共有151个宽度为1°的波束。

5.5.3 深海钻探

国际大洋钻探计划ODP及其前身深海钻探计划（DSDP）是迄今为止地球科学史上规模最大的海洋地球科学研究计划。DSDP的钻探船“格罗玛·挑战者”号（Glomar Challenger）在1968～1983年间在各大洋钻探了96航次，钻井1092口，获取岩心96000 m。其突出贡献是证实了海底扩张，发展了板块构造，创立了古海洋学理论。大洋钻探计划于1983年开始实施，1985年1月在墨西哥湾开钻。到目前为止，大洋钻探计划的钻探船“决心（Resolution）”号已远航作业58航次，获取岩心10×10^4 m。

ODP总部称“深地层采样联合海洋研究机构”（JOIDES：Joint Oceanographic Institute for Deep Earth Sampling），总部设在美国，由美国、法国、德国、日本、英国、加拿大、澳

大利亚、比利时、荷兰、丹麦、挪威、西班牙、芬兰、冰岛、瑞典、意大利、瑞士、希腊和土耳其等19国组成。中国现已参加该机构。

在即将到来的21世纪，不少国家制定了海洋钻探计划。其中包括日本的"21世纪大洋钻探计划（OD21）"、新西兰等国的"南极合营钻探项目（CRP）"和欧洲的"CORSAIRES"项目。日本"21世纪大洋钻探计划（OD21）"拟建中的钻探船其最大钻探深度可达3500 m。新西兰、德国、意大利、英国、美国和澳大利亚6国的"南极合营钻探项目（CRP）"的目标是南极罗伯茨角（Cape Roberts）近海的海底沉积物（刘光鼎，1995）。

5.5.4 海洋深部构造研究技术

70年代末期，美国科学家发明了双船地震方法，在探测海洋地壳-上地幔结构及大地构造研究方面发挥了重要作用。80年代初期，英国科学家改进了油气勘探的单船地震方法，加大了地震震源，增加了排列长度，从而可采集整个岩石圈的深地震反射剖面，为研究岩石圈结构和地球动力学提供了极其重要的资料（姚伯初，1998）。

5.6 地球物质研究技术

5.6.1 加速器技术

1）同步加速器辐射技术

随着高技术的发展，高强度准直同步加速器辐射源被引入地球科学研究。这种射线源是一种X射线源，在地球物质研究中具有广阔的前景。

自20世纪70年代以来，利用X射线研究地球物质的技术有了长足发展。70年代中期出现的X射线的强度达到了普通X射线的10^5～10^6倍。同步加速器辐射技术主要用于提供原子周围环境的直接结构信息，如配位数和距相邻原子的距离，研究高温高压设备中样品发生相变的机制和动力学，研究颗粒表面、界面和内部晶面的特性和微量元素在矿物和熔体之间的配分，测量粒径很小的样品中浓度很低的元素，等等。

2）加速器质谱技术

加速器质谱技术（AMS）是研究地球物质最重要的前沿技术之一。^{10}Be、^{14}C、^{26}Al、^{36}Cl、^{41}Ca和^{129}I的AMS测试已在地学许多领域作出了独特的贡献。这些宇宙成因核素特别适合于研究固体地球、大气圈和水圈之间的相互关系。AMS首批成果发表于70年代。自80年代以来，AMS研制的进展使得可以对许多核素进行直接原子计数，从而可将样品量减小3～6个数量级。在地球科学中常用的是^{14}C，可用于研究海洋的循环、古气候、日-地现象和碳迁移的比率等。^{10}Be主要用于全球构造研究中。把^{10}Be作为会聚板块边缘沉积物俯冲的示踪已卓有成效。岛弧火山岩中^{10}Be可帮助了解岛弧火山的成分演化和岛弧演化中海底沉积物的变化。用^{10}Be、^{26}Al和^{36}Cl可以确定地表岩石的出露时代和侵蚀速率。^{36}Cl和^{129}I可以测定1Ma时间尺度内的地下水年龄。^{36}Cl还可用于示踪地下水中的溶液运移（顾赤峰，1993）。

5.6.2 微束分析

1）离子探针

离子显微探针分析是二次离子质谱技术（SIMS）的一种形式。它的特点是能进行定点

微区分析，成像功能高，灵敏度高，能测定周期表中所有元素和同位素。与常规的质谱方法相比，离子探针所消耗的试料很少（1ng），分辨率高（几 μm），能对抛光薄片进行原位定点分析。与电子探针相比，离子探针的检测限低，不仅可用于元素分析，而且可用于同位素分析（陈华，1993）。

目前离子探针的应用范围主要有：

（1）轻元素分析。即原子序数小于 10 的元素，如 Li，Be，B 甚至 H，填补了电子探针的空白。

（2）痕量元素包括稀土元素分析。其检测限比电子探针低 1～3 个数量级。

（3）同位素分析。其中成功的应用包括硫同位素研究，锆石 U-Pb 年代测定和陨石同位素异常的研究，还有不少人对 H（D）、B、C、O、Re 和 Os 等做了大量的工作。

（4）深度剖面和表面分析。

（5）扩散测量。

（6）成像。

2）激光探针

激光探针技术是在 20 世纪 90 年代初发展起来的。Z. D. Sharp 首先报道了使用 BrF_5 的 CO_2 激光系统进行硅酸盐矿物的氧同位素分析技术。它可用于样品量少与 1mg 的单矿物粉末或全岩样品分析，其精度可与传统方法相比拟（0.1‰，1σ）。与此同时，单晶矿物原位（in situ）分析的空间分辨率达到<100μm。激光探针技术在解决使用传统方法未能满意解决的难熔矿物分析方面亦取得满意结果。D. E. Crowe 等人，S. A. Kelly 和 A. E. Fallick，以及 D. Elsenheimer 和 J. M. Valley 先后报道了使用激光探针进行硫和氧同位素分析的结果；P. C. Smalley 等人和 J. A. D. Dickson 等人报道了碳同位素分析的激光探针技术。激光熔样所需样品极少，有时可低达 0.1 mg。激光氟化技术可达极高温度，估计可达 2000 K，能对难熔矿物进行氧同位素分析（肖益林、傅斌、郑永飞，1998）。

80 年代中、后期出现了将激光熔蚀微区探针技术（LAM）与电感耦合等离子体质谱（ICP MS）结合用于固体样品分析的新技术。其基本原理是将激光束聚焦于样品微区，使之熔蚀气化，然后将样品微粒带入等离子体中电离，经质谱系统进行质量过滤，由接受器分别检测不同荷质比的离子。这一技术在单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究、包裹体成分分析、生物壳体、骨骼和组织等微量元素分布测定、矿物微区成分分析、高温高压实验中元素在结晶相和熔融相的分配系数的测定，以及微区高精度同位素测量等方面具有很大的潜力（刘海臣，1998）。

3）同步辐射 X 射线荧光探针

X 射线荧光（XRF）作为常量和低含量元素的检测手段，其下限一般为 10^{-6}级。同步辐射（SR）源的使用使 X 射线荧光的检测限降低至 10^{-12}级。

同步辐射 X 射线荧光探针于 1986 年设计成功。与常规 X 射线荧光相比，同步辐射 X 射线荧光探针有具偏振光、高准直性和高亮度的优点，特别适合在小范围内进行痕量元素分析。同步辐射 X 射线荧光探针分析对于 10^{-6}以下痕量元素的分析其精度比常规技术如电子探针和原子吸收光谱等高，检测限低，能测量元素的表面分布和体积分布。现在已可在 $100\mu m^2$ 束斑范围内用同步辐射 X 射线荧光探针测定 10^{-15}g 量级的特定元素。同步辐射 X 射线荧光探针的穿透深度比电子探针和离子探针大得多，可对单个流体包裹体进行非破坏

性研究，能测定 5～10μm 大小的包裹体溶液中 10^{-12}g 级的微量元素。

目前用同步辐射 X 射线荧光探针研究的地质材料主要有宇宙尘、月岩、陨石球粒和卡林型金矿等。

4）俄歇电子谱分析

俄歇电子来自固体的近表面区域（几个原子层），能反映近表面区域的化学组成，主要用于研究材料表面。其优点是：①可以分析原子序数≥3 的元素；②侧向分辨率高（<0.1μm），可用于研究表面微区组成；③结合离子溅射技术研究深度剖面，得到矿物近表面组成随深度的变化情况。因此，俄歇电子谱（AES）分析对于在原子尺度上理解矿物间的反应机制是很重要的（李一良、魏春生、郑永飞，1998）。

5）质子显微探针

质子显微探针（PMP）于 20 世纪 70 年代初问世，是一种能在无损样品的条件下，检测微米级微区物质中痕量元素含量和空间分布信息的方法。质子显微探针与其他核分析技术（如 RBS、NRA 等）相结合，能测定原子序数小于 11 的超轻元素。

5.6.3 固体矿物高分辨核磁共振研究

固体高分辨核磁共振用于矿物学研究始于 20 世纪 80 年代。它在矿物学研究中具有巨大的潜力。核磁共振现象（NMR）发现于 1946 年。50 年代至 70 年代中期，人们用核磁共振方法对大批矿物进行了研究。然而，用常规核磁共振方法研究固体有很大的局限性。所获得的核磁共振谱是宽谱线，分辨率及灵敏度均较低。为了获得高分辨率的核磁共振谱，可以有多种方法，目前使用最多的是“魔角样品旋转”（MASS 或 MAS：Magic Angle Sample Spinning）或多脉冲方法。此外，高功率质子去耦和交叉极化（CP：Cross Polarization）等技术也常被采用。将这些双共振技术和上述魔角样品旋转与多脉冲技术结合，其效果更好。

核磁共振目前主要用于沸石、蒙脱石、蛭石、伊利石和混层粘土矿物以及硼酸盐和硼硅酸盐矿物的结构以及长石、霞石和白榴石中 Si 和 Al 的分布及其有序度研究。此外，核磁共振还用于某些矿物，如钙镁黄长石（$Ca_2MgSi_2O_7$）的相变、高岭石和叶蜡石的脱羟反应等（林传易，1993）。

5.6.4 高温高压实验技术

30～40 年代以来，高温高压实验一直持续发展。美国华盛顿的卡内奇研究所实验温度达 4000℃，压力达 170×10^6kPa，能够进行从地表到地核的条件的各种实验。

近 20 年来超高压技术获得了迅猛的发展。人们采用金刚石压砧来实现超高压实验。目前在实验室中已可获得约 5.6×10^8kPa 的静高压，比地核压力 3.6×10^8 kPa 还高出 1×10^8kPa。现已可以在这种压力下，将系统加热到 2000℃或更高温度，应用各种物理方法，如激光技术、X 射线、拉曼光谱、红外光谱等方法进行物理参数、化学参数和地球物理参数等的测定[❶]。可以测出不同温压条件下岩石矿物的纵波和横波速度、弹性波速的各向异性、岩石变形及强度性质以及岩石矿物的电性和结构等。

在超高压条件下对气体和流体的实验研究方面，人们在几亿个千帕下观察了氢和氮的金属相变。许多物质在高压下非晶态化；许多物质在极高压力下具超导性。同时。在高温高压下对生命物质的研究也在进行中。目前已发现在高温高压下可合成蛋白质。

---

❶ 张荣华．发展高压科学实验——迎接 21 世纪地学的新纪元（未刊）．

5.7 古地磁研究

古地磁数据可靠性判据的讨论始于20世纪60年代。到80年代世界上的主要陆块多数已经积累了大量的古地磁数据。进入90年代，大规模的采样测试工作日趋减少，相应地对已有数据的分析研究得到了加强。目前对古地磁数据可靠性主要有两种判别方式：一种是Van dez Voo提出的7条判别标志，已为多数人所接受；另一种是Schmidt等人所采用的条件递加式判别（程国良，1993）。

Van dez Voo（1990）提出的7条判别标志是：①岩石年龄确切，且推测磁化年龄和岩石年龄相同，显生宙年龄要准确到半个地质纪或地质年龄的±4%或±40Ma；②要有足够的标本数，$n>24$，精度κ(或K)$\geqslant 10$，α_{95}(或A_{95})$\leqslant 16$；③确实做过矢量减法、分离磁化的适当磁清洗；④要对磁化年龄进行野外检验；⑤小构造控制及其与所在克拉通或地块的构造关系清楚；⑥出现反向磁化；⑦同较年轻的（大于一个纪）古极点位置不类似。

5.8 地学信息系统

从20世纪60年代开始，世界上一些先进国家开始建设国家级地球科学数据库，到80年代初世界上已有约500个大型地球科学数据库。

80年代以来，世界进入了信息时代。这一时期，在世界上出现了一批全球性的观测网。同时，计算机技术与通讯技术也得到了飞速发展。这些发展极大地增强了信息的获取、输入、存储、检索、分析、传输和交换的能力，使地球科学信息系统逐渐从独立的数据库向数据库联网发展，从单一数据向数据集成发展，从区域信息系统向全球信息系统发展。从20世纪90年代后期至21世纪初，全球将面临信息革命的第二次冲击。

国际科学联合理事会下属的世界数据中心（WDC）是全球最大的地球科学信息系统。该数据中心目前有5个地区中心：WDC-A（美国）、WDC-B（俄罗斯）、WDC-C_1（欧洲）、WDC-C_2（日本）和WDC-D（中国），共有40余个学科数据库，涉及地球物理、海洋、气象、地质、地震、地理和日-地物理等地球科学的广阔领域。从1958年的国际地球物理年开始，几乎每一个大型国际地球科学研究计划都配有相应的数据管理机构或项目。如目前正在执行的国际地圈-生物圈计划（IGBP）、世界气候研究计划（WCRP）、日-地能量研究计划（STEP）和国际岩石圈计划（ILP）等都有专门的数据管理机构。在地球科学信息系统领域内目前正在或即将建设地球观测系统（EOS）和全球数字地震台网等全球观测网络。这些网络的建成将为地球系统科学数据的获取提供有力保证。

5.8.1 地质信息管理和地学信息系统

地质信息管理和地学信息系统所涉及的内容包括地学数据库、地理信息系统和多媒体的应用、地学模拟、计算机辅助矿产勘查评价、矿产资源评价、钻孔编录、信息系统、国际互联网在地学中的应用、地学文献和图书馆问题等。

1）数据的集成与综合

对多源地学信息进行综合分析解释是目前地学研究发展的重点。人们经过近30年的努力，现已建立了各种地学数据库和信息系统。但由于这些数据库是由不同用户、为不同目

的、在不同时间建立的，因此在数据的内容、质量、所采用的标准和数据格式等方面都存在着差异。如何利用这些现有的数据资源，对多源地学信息进行综合分析已成为目前必须解决的问题。

2）多媒体与网络

多媒体系统是把正文、图形、图像、视频和语言等五种传播信息的媒体综合运用在一个系统中。由系统对这些媒体的信号进行综合处理和传输，是当前计算机工业的热点之一。在地学领域，由于研究对象本身的复杂性，使得这个领域中虽然定量研究的程度不断提高，但定性分析仍占主导地位。因此，有必要用多种技术手段对所获取的信息进行对比、分析，并用以推断未知。因此，在地学领域内，多媒体技术在信息表达、成果展示和辅助教学等方面都有着广阔的发展前景。从 90 年代开始不少发达国家已将多媒体技术用于地学研究。

计算机网络是计算机技术与通讯技术相结合的产物。国际互联网 INTERNET 已成为国际重大地学研究项目如 1989 年开始的全球变化研究等和许多国家地质调查机构发布信息的主要途径。美国地质调查局于 1993 年 6 月在 INTERNET 上开通了它的 WWW 服务器。90 年代初，加拿大地质调查局也开始通过 INTERNET 提供地学信息的存取服务。日本地质调查局正在将他们开发的有关地学数据库与 INTERNET 相连，也采用了 WWW 服务器方式向用户提供信息服务。

3）地质统计学

地质统计学方法以空间数字信息为处理对象。它萌芽于 20 世纪 40 年代，发展于 60～70 年代，而完善于 80～90 年代。传统的统计学不考虑观测点的空间关系，而地质学研究的恰恰是各种观测点的空间关系。为此，地质统计学发展了变差函数、体积-方差关系和克里格法等自己的基本工具。80～90 年代，地质统计学迅速从单变量领域进入多变量领域。

现代地质统计学最重要的组成部分包括 D. G. Krige 创立的克里格法，De Wijs 提出的体积-方差关系，G. Matheron 建立的地质统计学理论，D. Myers 在多元统计学方面的重大贡献，以及 A. G. Journel 对非线性地质统计学的实用性研究等。80 年代，地质统计学方法被广泛计算机化。我国推出的 KPX 矿产普查评价系统包含有完善的地质统计学软件（李裕伟，1998）。

5.8.2 地质体数学特征及地质灾害和矿产资源定量预测方法

地质体数学特征的研究目前已由应用较简单的概率统计和多元统计方法走向应用一些较复杂的新方法，由线性科学方法发展到非线性科学方法，从而大大提高了地质体数学特征研究的精确程度和可靠程度。与此同时，地质体数学特征研究也由二维方法发展至三维方法。G. M. Crisci 应用微分方程建立的模拟火山岩流和塌方的二维数学模型可以对火山岩流和塌方的时间、地点和演化过程进行预报，同时还可以模拟和研究由于人类采取干预措施对火山熔岩流和塌方产生的效应。张菊明应用三维拟合函数对各种复杂地质体进行了模拟。有关地质体数学特征研究的理论、方法和结果，除主要应用于矿产预测外，目前还扩大到地震预测、岩体不连续性预测和地下工程稳定性预测等方面。王世称等人应用“综合信息矿产资源评价”的理论和方法对中国很多省份的多种矿产所进行的评价预测取得了明显的成效。其内容包括：编制综合信息预测图，建立综合信息找矿模型，地质体和矿产资源体的统计单元描述，提取综合控矿信息，有效变量评价，模型单元选择，建立数学模型和进行风险评价等。

5.8.3 地质过程的数学模拟及计算机图式

地质过程的数学模拟所涉及的内容很广，它包括：①沉积学——浊流沉积作用的计算机模拟；②构造地质学——断裂和盆地的形成以及深部地壳结构的3D计算机模拟；③地球物理学——重磁势场3D模拟；④地球化学——热液过程中的质量体积变化，高温高压下的地质流体，以及热和物质的迁移反应动力学；⑤矿床学——地质统计学和人工智能系统的应用；⑥岩石学——岩石结构及矿物结构的3D可视化；⑦环境科学——海平面变化、降水的模拟与预测。

计算机成图方面，在第30届国际地质大会上反映出来的主要有中国介绍的MAPCAD、MGCAD软件系统和日本大阪大学介绍的断裂处理技术。

5.8.4 数学地质的新理论、新方法及其应用

数学地质研究所涉及的学科领域和运用范围已越来越广。除成矿预测和矿产勘查外，目前主要涉及基础地质（岩石化学成分研究、测定和数据分析等）、物探数据分析（重力勘探、电测井、放射性物探等）、地震统计预报和石油勘探等。

数学地质研究中的新理论、新方法主要涉及分形理论、人工神经网络（ANN）技术、图像分析及图形推理技术，以及地质统计学、灰色理论和正交理论等。

数学地质方法在石油勘探中的应用，主要有利用确定空间抽样概率的办法进行钻井孔位优选，用伪熵准则确定石油钻井井位。

5.9 地学生态监测系统

自然界是由各种各样的生态系统所组成的。各种生态系统（如农业、森林、草地、湖泊和海洋等生态系统）和生态过程（如水分、养分和能量的平衡与循环）是人类赖以生存和发展的基础。

20世纪60年代初至70年代中是生态系统生态学的一个重要发展阶段。在这一时期，国际科学联合会（ICSU）组织了有70多个国家参加的“国际生物学计划（IBP)”。80年代以来，生态系统的研究仍然是生态学研究的核心，如“国际地圈-生物圈计划（IGBP)”“全球环境变化的人类影响计划（UDP)”等。

5.9.1 生态系统研究的新方向

生态系统研究的新方向是进行长期的网络式的研究（孙鸿烈、赵士洞、江洪，1995)。最近10余年来，一些国家、国际组织和国际合作项目纷纷建立了长期生态学观测与研究网络，如美国1979年建立的“长期生态学研究网络（LTER)”，英国1992年建立的“环境变化研究网络（ECN)”，联合国开发计划署（UNDP）建立的“全球环境监测系统（GEMS)”，以及联合国教科文组织和国际科学联合会等组织联合建立的“全球陆地生态系统观测系统（CTOS)”等。中国于1988年开始进行生态系统研究网络（CERN）的研究与设计，从1989年开始进行了中国主要类型森林生态系统的网络化研究。

5.9.2 地学生态监测系统

地学生态监测系统主要包括如下内容：

1）土地状况的监测与评估

其中包括在地理信息系统支持下，应用遥感技术定期、快速提供土地状况，分析土地

的时空变化和土地承载力。

2）水资源状况的调查、监测与评估

水资源短缺是人类在21世纪面临的一个普遍而严重的问题。在地理信息系统支持下，应用遥感技术调查和监测河流、湖泊、冰雪和湿地的状况和变化是进行水资源管理和制定治理规划的科学依据。

3）自然灾害的监测与评估

遥感技术在减少自然灾害和对灾害进行评估方面发挥着重大作用。美国气象卫星的投资为3亿美元，应用效益达20亿美元，投资效益比为1∶7；原苏联遥感的投资效益比达1∶10。

4）生物量变化监测

生物量变化是生态环境变化的重要指标，也是全球变化的重要内容。生物量变化监测包括主要农作物产量、草场生物量和海洋生物量的预测与评估、农产品供需状况的分析以及生物量结构变化对资源和环境的影响等。

5）全球环境变化监测

当前，整个世界面临着紧迫的环境问题。如臭氧洞的出现与扩大、温室效应、厄尔尼诺现象、气象异常及灾害、酸雨和荒漠化等。它们极大地威胁着人类的生存。全球环境问题已远远超出任何单一学科的研究领域。它们是地球系统各组成部分（大气圈、水圈、岩石圈和生物圈）之间的相互作用，是物理、化学和生物过程的相互作用，以及人与环境相互作用的结果，是地球系统的整体行为。这当中，人类的活动日渐增强。人类的活动导致了地球植被变化，土地荒漠化，气候变化和大气中主要微量气体含量分布的变化。人类活动是全球变化中最活跃、最具全球意义的因子。在这里，卫星遥感预测与科学数据库的建立在全球变化研究中具有十分重要的作用（徐冠华，1995）。

5.10 太阳系形成及演化的研究方法

5.10.1 太阳星云凝聚研究

太阳星云的演化可以作为一个从高温气态逐渐冷却凝聚的热力学体系来研究。星云的初始化学组成可由CI型碳质球粒陨石的全岩化学组成和太阳光球的光谱数据获得。

从陨石学的角度来看，碳质球粒陨石的重要组成部分富Ca、Al包体（简称CAI）主要由黄长石、尖晶石、富Ca辉石和钙长石等组成。CAI形成于太阳星云的高温过程。因此对CAI的研究将揭示太阳星云早期的演化历史。

5.10.2 太阳星云的不均一性研究

球粒陨石是太阳系最原始的演化产物，人们可以通过对球粒陨石系统的全岩化学组成分析来揭示太阳星云的化学组成在空间上的变化特征。研究表明，球粒陨石之间在全岩化学组成上有着明显的差异。

太阳星云的同位素也是不均一的。在陨石中开展同位素研究最早的是氧同位素。它也是最先发现具异常同位素的元素之一。氧同位素异常的发现表明太阳星云没有达到氧同位素的均一状态。

5.10.3 前太阳物质的分离

稀有气体，特别是 Xe 具有 9 个稳定同位素，可以用来鉴别复杂混合体系的各种组分，并在前太阳物质的分离中作为判别标志加以检测分析。目前已分离出的前太阳物质有金刚石、碳化硅和石墨。其他可能的组分有刚玉和 TiC 等。

5.10.4 陨石的撞击变质研究

类地行星、月球及其他一些卫星表面分布有大量的陨石撞击坑，表明撞击曾是太阳系十分普遍的过程。陨石中的角砾构造、矿物晶体破碎、波状消光、长石熔化、晶格变形、熔融和冲击高压相的出现等，是陨石遭受冲击变质的结果和证明。除常规的岩矿鉴定、扫描电子显微镜和电子探针分析技术外，透射电子显微镜和激光探针拉曼光谱是研究陨石冲击变质的重要手段。

5.10.5 太阳系形成和演化的时间坐标研究

地质研究中广泛使用的各种同位素定年体系和方法，包括 K-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd、U-Th-Pb 等同样可以作为太阳系形成和演化的时间尺标。不同同位素体系给出的球粒陨石全岩等时年龄和矿物等时年龄在分析误差范围内基本一致，约 4.56Ga，大致代表了太阳系的形成年龄。最近用 Re-Os 法获得的铁陨石的年龄为（4.61 ± 0.01）Ga（林杨挺、欧阳自远，1998）。

主要参考文献

刘光鼎．1995．海洋高技术．见：《走向 21 世纪的中国地球科学》调研组编．走向 21 世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社．

刘海臣．1998．LAM-ICP MS：一项在地球化学研究领域极具潜力的新技术．地学前缘，第 5 卷第 1-2 期，324．

刘福田，白星碧．1995．地球深部探测技术．见：《走向 21 世纪的中国地球科学》调研组编．走向 21 世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社．

孙鸿烈，赵士洞，江洪．1995．中国生态系统研究和监测网络．见：《21 世纪的中国地球科学》调研组编．21 世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社．

李一良，魏春生，郑永飞．1998．俄歇电子谱学在地球化学中的应用．地学前缘，第 5 卷第 1-2 期，311～323．

李舟波，王祝文．1998．科学钻探中的元素测井技术．地学前缘，第 5 卷第 1-2 期，119～130．

李裕伟．1998．空间信息技术的发展及其在地球科学中的应用．地学前缘，第 5 卷第 1-2 期，335～341．

吴其斌，张肇元．1991．全球地学大断面计划．见：项仁杰，史崇周，冯昭贤主编．地壳和上地幔研究．北京：地震出版社．

吴其斌．1996．油气勘查的某些非常规物探方法：综述．见：中国地质矿产信息研究院编．走向 21 世纪的地学与矿产资源．北京：地质出版社．

吴其斌．1996．物探方法寻找隐伏矿床：综述．见：中国地质矿产信息研究院编．走向 21 世纪的地学与矿产资源．北京：地质出版社．

陈华．1993．新的微束分析技术在地学中的应用研究．见：肖庆辉等编．当代地质科学前沿．武汉：中国地质大学出版社．

肖益林，傅斌，郑永飞．1998．激光探针分析在氧同位素地球化学研究中的应用．地学前缘，第 5 卷第 1-2 期，283～293．

肖庆辉．1993．一些前沿技术领域概述．见：肖庆辉等编．当代地质科学前沿．武汉：中国地质大学出版社．

肖庆辉．1995．大陆科学钻探．见：《走向 21 世纪的中国地球科学》调研组编．走向 21 世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社．

林杨挺，欧阳自远．1998．太阳系形成及演化研究方法．地学前缘，第 5 卷第 1-2 期，61～71．

林传易．1993．矿物固体高分辨核磁共振研究．见：肖庆辉等编．当代地质科学前沿．武汉：中国地质大学出版社．

张伟．1993. 大陆科学超深钻技术．见：肖庆辉等编．当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域．武汉：中国地质大学出版社．

姚伯初．1998. 用海洋地震方法研究岩石圈结构．地学前缘，第5卷第1-2期，111～118.

顾赤峰．1993. 地球物质研究的几个新的技术．见：肖庆辉等编．当代地质科学前沿．武汉：中国地质大学出版社．

徐冠华．1995. 遥感应用与地理信息系统．见：《走向21世纪的中国地球科学》调研组编．走向21世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社．

徐冠华．1995. 中国资源与环境信息工程．见：《21世纪的中国地球科学》调研组编．走向21世纪的中国地球科学．郑州：河南科学技术出版社．

高林．1991. 应用地球物理学的新分支——油藏地球物理．见：当代地质科学技术进展．武汉：中国地质大学出版社．

谢学锦．1998. 战术性与战略性的深穿透地球化学方法．地学前缘，第5卷第1-2期，171～183.

程国良．1993. 古地磁数据的判据．见：肖庆辉等编．当代地质科学前沿．武汉：中国地质大学出版社．

Perisov A V. 1998. 世纪之交的遥感方法．见：第30届国际地质大会论文集（第10卷），地学新技术方法．北京：地质出版社．

ICOG-9 Organizing committee. 1998. The Abstracts of ICOG-9 (Ninth International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology). Chinese Science Bulletin, Vol. 43 Supplement, August 1998. Beijing: Science in China Press.

第6章　地质资源、环境与社会的可持续发展

地球科学和地质学家的工作是保证人类社会在21世纪持续发展的关键。我们正处在科学技术飞速发展、社会经济空前繁荣的时代，这种发展和繁荣极大地依赖于能源、矿产资源和水资源的开发和利用。但是，对于这些宝贵的资源，在某些地区和领域仍在不顾未来地浪费和滥用，并且已经或正在给我们的下一代的生存与发展造成负面的影响。地质学家有责任用事实和数据给人们鸣响警钟，提出促进人口、资源、环境和谐发展的对策，揭开地球科学发展的新篇章。

6.1　能源与经济发展

人类社会消耗的90%的能源来自于矿产资源。

工业化程度高低，生活水准的高低都直接与能源消耗成正消长关系（图6.1）。工农业生产中的机械化程度和电气化程度对生产力水平提高起着决定性的作用。农业本身就是一个庞大的能量转换系统，通过太阳能把H_2O与CO_2转化为碳水化合物，贮存在食物和其他农产品中，农业现代化的过程就是由能源推动的机械来代替人畜劳作，生产出更多的农产品。1920年美国农业人口3200万，1960年减少了一半，到70年代中期再减一半，为780万，而这一阶段，能耗增加了2.2倍，谷物单位面积产量增加了5倍，但所用工时则由原来的57h减至17 h。消耗在农业机械的汽油约$1682\times10^4\ m^3/a$，柴油$1318\times10^4\ m^3/a$，液化气$50\times10^4\ m^3/a$。平均生产1 t谷物用油0.04m^3。美国每人每年用于食物有关的能源为59$\times10^9$ J。据1991年统计，全球石化燃料的25%被用于与食物有关的生产和加工过程。我国是发展中国家，工业化和农业机械化程度还不高，也有20%左右的能源被用于此。

能源对于人类技术进步起到了火车头的作用，人类历史上3次能源技术应用的转变：蒸汽、电力、原子能都引起了生产技术的重大变革。

人们物质与文化生活所消耗的一切物品均体现了能源的最终消耗（图6.2、表6.1）。

国民经济的增长与能源之间关系密切，一般来说，能源增长与国民生产总值（GDP）的增长速度成正相关。能源消耗弹性系数，即能源消耗和国民生产总值两者年平均增长速度之间的比值，基本上能反映这种关系（表6.2）。1962～1972年，日本能耗增长最快达11.7%，其GDP增长也最快，达10.3%，而能耗增长较慢（2.2%）的美国其GDP年均增长仅2.8%。但随着新技术、新设备、新工艺的应用，能源结构的改变和能源管理的改善，GDP增长速度在能耗增长较低的情况下，也可能飞速发展。

能源供应对工业布局有重要影响，单位产值耗能大的工业，如炼铝1 t，耗6.68 t标准煤，其能耗占成本的1/3，故多建于靠近能源基地的地方。但科技进步改变了矿石原料和能耗在成本中所占比例之后，工业的地理布局也将在价值规律的支配下得到调整。

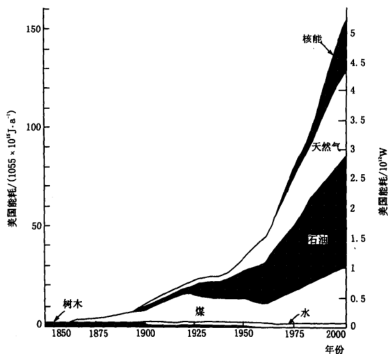


图 6.1　美国从 1850～2000 年能耗变化曲线图

（据 C. Starr，科学，1971，第 9 期，39 页）

注：在过去的世纪中能耗由树木、石油、天然气来提供，而未来世纪中能耗将依靠核能和煤

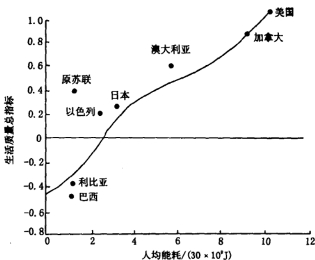


图 6.2　人均能耗与生活水平的关系

（据王庆一，1988）

表 6.1　1996 年主要矿产品人均消耗量对比　　单位：kg

矿产品	煤炭[②]	石油	钢[①]	铜	化肥	硫酸
世界平均	391	574	130	2.1	22	26.37
美　国	1940	3174	354	9.8	76	170.65
巴　西		467	158	1.47	27	26.79
中　国	544	140	82	0.95	29	15.40

①钢为产量；②煤为油当量。

（据朱训．1999．世纪之交的中国矿业．中国矿业协会通讯，总第 39 期）

表 6.2　主要工业发达国家能源弹性系数的变化

	1960～1973 年	1973～1978 年	1980～1987 年
美国	1.07	0.69	0.03
加拿大	0.94	0.58	0.31
日本	1.00	0.43	0.45
法国	1.00	0.40	0.38
原联邦德国	1.06	0.96	0.12
意大利	1.81	1.15	—
英国	0.71	0.55	0.42
经合组织平均	0.98	0.76	—

资料来源：(1) 日本《能源》杂志，1982 年第 12 期，1983 年第 2 期；(2) 世界银行《1989 年世界发展报告》。

能源的开发，能源基地的建立，能带动一个地区相关的产业发展，如炼油、石油化工、钢铁、建材、电力、有色、机械、交通、通讯等工业腾飞。中国的大庆、大同、抚顺、德国的鲁尔、美国的阿巴拉契亚、英国的中部地区、原苏联的库兹巴斯等就是以能源为主业的复合型工业基地。

主要能源结构的改变会影响产业结构的调整。70 年代中期，全球石油价格的上涨引发了世界能源危机，对西方能源缺乏的工业国家造成了极大冲击。以日本为例，其能耗高的重、化工业利润急剧下降甚至转为亏损，钢铁、造船、化工、纺织、造纸等明显衰退，日本采取了用节省能源和其他工业原材料的知识密集型产业来代替原高耗能的产业，推动了电子机械工业的迅速发展，产品结构也向高科技含量、高附加值、低能耗和低原材料消耗方向发展，从 1973～1980 年，就少进口原油 1.77×10^8 t。其国民生产总值每增长 1%，所用能耗的增长由 1973 年以前的 1.1%减到 0.46%，每亿美元产值能耗由 1970 年的 9.1×10^4 t 标准煤降至 1985 年的 4.4×10^4 t。

可见，产业结构与能源结构之间存在着密切的关系，产业结构的变化不仅影响着能源的利用效益，在一定程度上也影响产业部门能源消费结构（表 6.3、6.4）。

中国正处在工业迅速发展和基础设施建设阶段，能耗增长速度和单位产值能耗都相当高，这已引起了经济界和有关部门的高度重视。

未来社会经济发展与地质能源关系密切。按世界能源会议分类：固体燃料、液体燃料、

气体燃料、核能、地热能等几种能源属于地质资源。

煤是最重要的固体燃料，全球已探明 2×10^{12} t 油当量的煤储量，约占已探明非再生能源的 90%，可供全人类使用 230a，其中原苏联、美国、中国的煤储量占全世界已探明储量的 57.3%，其次是澳、法、印、南非、波等国合占 31.7%。

表 6.3　1983 年世界几个主要国家工业能耗构成

国　家	总消费量 10^6 t 标准煤	运输 %	工业 %	民用和商业 %	其他用途 %
美国	1250.34	35.0	27.1	34.7	3.3
日本	237.02	20.1	47.0	27.9	5.0
原联邦德国	184.82	22.3	36.0	38.6	2.8
英国	133.78	25.8	31.0	40.6	2.7
中国	656.57	4.9	62.7	19.8	

（中国科学院能源研究所，1986）

表 6.4　中国 1997 年能源生产总量及消耗总量构成（%）

项　目	总　量①	原　煤	原　油	天然气	水　电
生产	131989	74.3	17.4	2.3	6.0
消费	142000	73.5	18.6	2.2	5.7

①以万吨标准煤为单位。　　（据朱训，1999）

20 世纪初，94.5%的能源来自于煤，至今仍占 30%。中国是煤炭使用大户，75%能源依赖于煤。中国成煤期多，储量大，分布广，煤种齐，开发易。煤炭及其相关产业，不仅为中国经济发展提供了丰富的能源，还推动了产煤区地方经济的发展。

石油天然气是当今世界最重要的能源，有国民经济的“血液”之称。特别是 20 世纪的 40～50 年代，由于中东大型油气资源区的发现引发了资本主义世界的动力革命，石油消费剧增，年消费增长达 7.4%，60 年代中期以来，油气消费占能源总消费的 62%～65%（表 6.5、6.6）。利于油气的沉积盆地 1027 个，有 27%的盆地已勘探。据估计，世界石油最终可采储量 2460×10^8～3040×10^8 t，天然气为 310×10^{12} m^3（表 6.7）。据 IEA 资料，1998 年世界石油平均需求量为 74.3×10^6 桶/日，1999 年增至 75.7×10^6 桶/日。经济合作与发展组织工业国家 1998 年石油需求量为 46.7×10^6 桶/日，1999 年可达 47.3×10^6 桶/日。我国已成为世界重要的油气资源保有与生产国。为了满足需求剧增的能源，各国正向深部、向海洋、向荒漠进军，以保证社会经济持续发展的能源供给。

核能很可能是化石能源之后供人类使用的又一种动力，1981 年世界拥有核电的国家 23 个，核电站 266 个；1989 年核电已占世界总发电量的 17%，20 世纪末全世界将有核电站 515 座，装机容量 4.78×10^8 kW。1985 年，世界核电已达 3.12×10^8 t 油当量，预计 2000 年将

达 6.37×10⁸ t，2020 年则可能达到 11.13×10⁸ t 油当量，有价值的铀矿床以北美、非洲和澳大利亚为丰富（表 6.8）。中国也已发现 200 多个铀矿床，并已具备发展核电的基本条件，1994 年底装机容量 210×10^4 kW，发电 14×10^9 kW·h，2010 年中国将有另外四座 8 套机组运行，装机总容量将提高到 2000×10^4 kW。

表 6.5 世界商品能源生产和消耗构成

年份	生产量 10^4t 标准煤	占生产总量比重/%				消耗量 10^4t 标准煤	占消耗量比重/%				人均能源消耗 kg
		固体	液体	气体	电力		固体	液体	气体	电力	
1950	266400	59.3	29.8	9.3	1.6	249300	61.1	27.0	9.8	1.7	1004
1955	342600	52.7	34.4	11.2	1.7	324300	55.9	30.6	11.7	1.8	1196
1960	447800	48.9	35.8	13.3	1.9	424300	52.0	32.0	14.0	2.0	1428
1965	558800	40.6	41.2	16.1	2.1	521200	43.3	37.5	17.0	2.2	1587
1967	607100	37.6	44.3	17.2	2.1	561500	38.8	40.4	18.5	2.3	1647
1970	742000	32.6	46.6	18.7	2.1	687700	35.2	42.7	19.9	2.2	1908
1973	850400	29.2	49.8	18.9	2.2	785500	31.7	45.8	20.1	2.4	2065
1975	855500	30.8	47.2	19.4	2.6	800300	32.8	44.1	20.4	2.8	2028
1980	926462	28.3	48.5	19.9	3.3	854483	30.8	44.2	21.5	2.5	1919
1985	951379	31.5	41.0	22.1	4.5	919488	33.0	39.4	22.9	4.7	1895
1988	1047438	31.1	42.0	23.3	4.7	1001322	32.9	39.2	23.0	4.9	1959
1990	—	—	—	—	—	1147610	27.3	38.6	21.7	12.4	—
1991	—	—	—	—	—	1115430	28.0	40.2	22.7	9.1	—

资源来源：(1) 联合国《世界能源供应》，1950～1976 年，1985 年；(2) 联合国《1988 年能源统计年鉴》，1990 年；(3)《世界能源导报》，1991 年 12 月 15 日第 2 版；(4)《世界能源导报》，1992 年 10 月 30 日第 2 版。

其他地质能源如地热能、油页岩、煤层气、油砂等也都逐渐得到利用，成为能源紧缺的重要补充。

能源消耗仍在增长，石油仍是世界能源的主要支柱，随着新技术革命其他能源的开发利用已日渐扩大。2020 年世界一次能源的消耗将比 1995 年增长 50%～75%，年增长率 1.2%～1.6%，今后一段时期，经济发展水平不同的国家能源消耗形势仍将有较大差别，发达国家仍将利用其资金雄厚的优势，发展能源技术，开发新能源，研制新设备，应用新工艺，调整能源结构，投资方向转向低能耗、高产值部门，能源弹性系数将维持下降趋势，至 2020 年，可能下降一半。而发展中国家的基础性产业所占比例高，工业发展速度快，人口增长快。能源消费的需求的增长是不可避免的。到 2010 年，发达国家能源消耗年增长率为 3.4%，而发展中国家仅 1.3%；前者在世界能源消费比例中将由 19.7%上升到 25.8%，后者将从 48.1%降至 39.4%。

表 6.6 世界一些主要工业发达国家进入“石油时代”的标志年份

国别	标志年份	总消耗量 10^4t 标准煤	固体 %	液体 %	气体 %	电力 %
美国	1951	119488	38.1	39.9	21.9	1.1
	1991	292920	23.1	40.3	24.6	11.8
英国	1972	29936	41.2	45.1	12.3	1.4
	1991	30830	30.1	37.7	23.6	8.6
法国	1965	15062	45.3	46.3	4.4	4.0
	1991	31470	9.5	40.6	12.6	37.1
原联邦德国	1968	27894	46.9	47.8	4.2	1.1
	1991	47510	33.2	38.2	17.0	11.2
意大利	1954	3115	35.2	39.9	12.7	12.2
	1988	207600	9.6	62.5	23.5	4.4
加拿大	1954	8244	39.9	45.2	5.2	9.7
	1988	275031	14.3	39.5	30.0	16.2
日本	1963	14676	44.0	48.6	1.7	5.7
	1991	67740	17.5	56.8	11.0	14.7
原苏联	1974	132419	35.8	36.9	26.0	1.3
	1990	198200	20.0	31.0	41.0	6.0

（据世界能源导报，1992）

表 6.7 世界常规原油原始可采资源的估算

区　域	总产量	储　量		未发现的可采资源概率范围			最终可采资源
		已探明	待探明	95%	众数	5%	众值/10^8t
北美	203.1	89.6	293.6	149	233	460	530
南美	67.4	48.9	116.4	29	47	99	160
欧洲	16	37.9	53.9	17	29	70	80
原苏联	96.9	99.7	196.6	84	153	490	350
非洲	45.9	74.4	120.1	40	66	150	190
中东	176.6	634.4	811	103	179	481	990
亚洲及澳大利亚	30	49.4	79.4	47	83	251	160
南极洲	0	0	0	0	0	0	0
世界	635.9	1034	1670	469	786	2024	2460

（根据 C. D. Master 等，1983）

各国根据本国情况制订了不同的能源发展战略。美国是世界最大的能源进口国，把能源安全可靠供应、节能和环保放在同等位置上来考虑，减少石油进口量，加强核电生产，加快煤与天然气开发，增加新能源的利用；独联体国家有丰富的能源资源，自给有余，现采

表 6.8 世界铀储量分布情况

国家或地区	工业铀储量/kt		推断铀储量/kt	
	1 kg U_3O_8 的售价在80美元以下的储量	1 kg U_3O_8 的售价在80～130美元的储量	1 kg U_3O_8 的售价在80美元以下的储量	1 kg U_3O_8 的售价在80～130美元的储量
美国	124	274	0	0
加拿大	153	96	112	99
南非	247.1	102.1	97.5	27.1
尼日尔	173.7	2.2	283.6	16.7
纳米比亚	97.3	16	30	23
加蓬	14.9	4.7	1.3	8.2
其余非洲国家	35.8	15.4	1.7	6.5
澳大利亚	462	56	257	127
法国	53.8	11.4	21.2	16.9
西班牙	26.7	6.2	9	0
其余欧洲国家	15.1	70.9	5.4	72.2
印度	34.7	11	2.1	14.5
其余亚洲国家	0	16.6	0	7.3
巴西	163.1	—	92.4	—
其余南美洲国家	13.8	7.3	7.7	5.0
共计	1615	689.6	921.7	423.5

注：本表不包括中国、原苏联及东欧国家的铀储量。 （据金景福等，1991）

表 6.9 1991年中国在世界能源生产中的地位

煤产量/10^6 t	原油产量/10^6 t	天然气产量/10^8 m^3	发电量/10^9 kW·h
中国 1087.4	原苏联 513.0	原苏联 8099	美国 2823.0
美国 901.4	沙特阿拉伯 407.9	美国 5285	原苏联 1633.9
原苏联 557.9	美国 368.6	加拿大 1301	日本 847.7
德国 352.1	伊朗 167.1	荷兰 831	中国 677.6
印度 240.7	中国 140.0	英国 552	德国 617.1
澳大利亚 225.9	墨西哥 138.9	阿尔及利亚 458	法国 499.8
波兰 209.7	委内瑞拉 117.1	沙特阿拉伯 450	加拿大 489.9
南非 171.4	UAE97.3	印度尼西亚 385	英国 427.7
捷克斯洛伐克 98.1	挪威 93.2	墨西哥 380	印度 281.7
英国 91.3	尼日利亚 92.9	UAE332	巴西 222.2①
世界总产量：4440.4	2996.0	21639.0	11812.0

资料来源：①1991年资料；其余为美国《Oil Gas》，1991年底，1992年3月《Statistics Monthly Report of UN》，1992年6，7月。

取石油、天然气、煤并重的战略；日本是能源贫乏的第二大石油进口国，抑制能源需求，加速核电和再生能源的发展，降低对进口石油的依赖程度；西欧推进积极寻找新能源的战略，提高核能、天然气的利用，推进风能，太阳能、地热能、生物能利用的研究，发展中国家多数以可再生能源作为其发展重点，占全球人口 3/4 的发展中国家能耗预计 2020 年仅占 40%，其能源结构中生物质能占 35%，其次是煤和石油分别占 28%和 23%，这些国家由于经济发展程度低，工业建设和人民生活耗能大，能源供应不足，电力紧张，生物质能消耗大，对生态环境造成巨大压力，化石燃料的低效使用，污染物排放正在形成严重的社会问题。

中国是世界第一大煤炭生产国，第五大石油生产国，发电量居世界第四（表 6.9）。其能源发展战略是优化重点和多样化发展，发挥煤炭的主导作用，制订合理规划，加速煤炭开发，满足社会需求，稳定能源供应，提高水能和核能开发和油气资源勘探开发的力度，合理、高效、清洁、节省地利用能源，特别是煤和油气是我国经济发展所面临的严重问题，与其他国家类似，权衡能源开发利用中可能产生的各种利弊，应用最新科技成果，尽最大可能兴利除弊，提高单位能耗的经济效益。

6.2 矿产资源与社会经济的发展

人类需要的自然资源中 70%，重工业原料中 90%都来自于矿产资源，是人类社会发展不可缺少的物质基础。与之有关的是原材料工业和采掘业，构成了工业的基础，是推动国民经济各部门发展的重要保证。人类历史的发展和生产力的进步与矿物原材料的利用关系密切，正因为此，历史学家就以此划分人类社会的历史阶段：石器时代，铜器时代和铁器时代。随人类文明的提高，对矿产资源的依赖程度不断提高。据统计人均国民产值 1000～4000 美元，对矿产品需求的增长最快。全球 1962 年矿业原矿总产值 2350 亿美元，1970 年 4300 亿美元，1982 年 9890 亿美元，1989 年达 11250 亿美元，25 年中增长 5 倍。矿产品国际贸易也在迅速增长，1963 年为 400 亿美元，1987 年为 4423 亿美元，增长 11 倍。

1981～1994 年，大多矿产增加不少探明储量，特别是黄金（表 6.10、6.11、6.12）。

矿产资源地理分布不均，绝大多数矿产资源 60%以上产量都集中于 5 个以内国家。近年随着主要发达国家从工业社会时代逐渐向信息社会时代过渡，矿业发展速度逐渐变缓，不少矿产品需求疲软，生产能力过剩，有些矿种过剩生产能力高达 15%以上，如钢铁高出 30.5%，铝 16%，铜 23%，水泥 19%，硫、磷、钾矿产过剩 40%；发达国家为其环保和经济回报率等原因，逐渐将其矿业向发展中国家转移，而矿产品深加工和高附加值的产品都得到了很大的发展，选冶技术的改进，进一步提高了矿产资源的利用率，金属的回收利用比例越来越高，1993 年世界钢产量的 30%，铅产量的 23.3%，精炼铜的 30%，精炼铝的 40.5%来自于废旧金属的回收，工业发达国家更高一些。

世界矿产品消费自 70 年代以来，增长速度部分放慢，部分加快，硫磷钾等农用矿产消耗量减少，铁铜铅锌低速增长，铝、镍中速增长，而锆、钛、高岭土、金刚石等快速增长，矿产品应用新领域的开拓也越来越广（表 6.13、6.14）。矿产品价格在低价位徘徊，1993 年以后有所回升，1992 年世界矿产品贸易额 6169.7 亿美元，其中燃料矿产 3260.7 亿美元，1980～1991 年金属矿产品贸易增长了 30%，非金属矿产品贸易额增长速度更快，80 年代前

就增加1倍以上。据统计，世界矿物原料产值结构中，能源矿产占75.64%，金属矿产值占12.11%，非金属矿产占12.25%。值得注意的是，原材料的消费开始了从较传统的金属向特种金属、合金、陶瓷塑料等方面转变。

表6.10　世界主要矿产资源储量基础①的变化

矿　　产	单　　位	1981年	1994年	1998年
Fe矿石②	10^8 t	980	1000	3000
Mn	10^8 t	49	49	50
铬铁矿③	10^8 t	33.6	70	76
Mo	10^4 t	985.2	1200	1200
W	10^4 t	290.5	330	320
Co	10^4 t	308.4	880	950
Ni	10^4 t	5423.9	11000	14000
V	10^4 t	1852.3	2700	2700
Cu	10^8 t	4.58	5.9	6.5
Pb	10^8 t	1.65	1.3	1.4
Zn	10^8 t	2	3.3	4.4
Au④	10^4 t	3.73	6.0	7.2
Ag	10^4 t	26.2	42	42
Pt族	10^4 t	3.72	6.6	7.8
REE⑤（REO）	10^4 t	701	4100	11000
铝土矿	10^8 t	224	280	340
Sn	10^4 t	1000	1000	1200
Nb	10^4 t	345	420	560
Ta	10^4 t	2.18	3.5	2.4
Bi	10^4 t	10	25	26
Sb⑥	10^4 t	453.5	470	320
Hg	10^4 t	15.3	24	24
沸石	10^4 t	4353.6	6200	—
S	10^8 t	22.75	35	35
钾（K_2O）	10^8 t	2038	170	170
萤石	10^8 t	5.6	3.1	2.0
重晶石	10^8 t	1.93	4.5	4.8
石墨⑦	10^8 t	1.54	3.8	3.6
菱镁矿	10^8 t	25.2	34	34
金刚石⑧	10^8 克拉	6.2	19	12
天然碱⑨	10^8 t	391.8	400	400

说明：①某些矿产的储量基础未列入；②可回收的金属体积；③商业品级，Cr_2O_3；④中国及其他一些国家未包括在内；⑤西方国家；⑥中国未包括在内；⑦估计价值；⑧工业标准；⑨相当于Na_2CO_3。

（据世界金属和矿物年报，1995；美国地质调查局年报，1998）

表 6.11 世界主要矿产品的产量

矿产品	单位	1980	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Fe 矿石	10^4 t	89610	91315	95761	98285	97560	95130	90400	93820
Mn 矿石	10^4 t	2639	2190	2370	2410	2500	2200	2000	1950
Cr 矿石	10^4 t	957.8	1076.4	1148.6	1220.2	1179.4	1200.9	940.1	829.9
Ni	10^4 t	74.9	81.1	86.7	89.7	88.0	87.3	90.0	82.6
Co	t	36744	50673	43900	38700	37136	26583	21924	17400
Mo	10^4 t	11.5	8.63	9.44	11.67	11.06	9.90	9.80	8.75
V	t	35911	33045	35409	35924	33614	31616	21917	
Cu	10^4 t	771.4	874.7	877.9	908.2	859.3	910.2	927.5	945.5
Pb	10^4 t	358.3	341.6	316.8	307.2	310.2	310.8	298.4	277.1
Zn	10^4 t	616.5	728.4	671.8	678.5	700.4	722.2	721.7	683.3
铝土矿	10^4 t	9306	9650	10256	10760	11485	11525	10833	11387
Sn	10^4 t	23.5	18.4	20.1	22.3	21.1	18.3	17.0	18.2
Sb	t	63212	63246	64124	64079	52514	47029	43520	35898
Hg①	t	8263	5534	5357	5620	4523	3213	3014	
Ti (TiO_2)	10^4 t	344	360.5	387.7	408.2	357.2	353	361.9	373
Au	t	1187	1601.5	1782.5	1857.5	2077.7	2029.7	2137.8	2143.0
Ag	t	10871	14241	14358	14615	14555	14094	13843	13362
Pt	t	103.4	116.4	120.0	121.0	126.0	125.2	117.9	129.4
W	t	54146	40990	50497	50780	51731	47930	36620	30002
Bi	t	360.8	356.5	361.2	375	386.1	356.6	427.4	438.7
REE (REO)	t	31826	47000	50000	62724	57943	66071	69105	65755
S	10^4 t	54626	5897.3	6033.2	6122.1	5936	5770.6	5743.2	5502
P	10^4 t	12908	15076.6	16344.7	16304	15793.8	14872.7	14247.4	11853.4
K (K_2O)	10^4 t	2753.7	2997.5	3189	2931.4	2737.4	2619.1	2410.1	2043.7
B②	10^4 t	260.9	268.5	299.4	298.8	301.8	296.5	260.8	
天然苏打③	10^4 t	2834	3020.3	3126.1	3203	3193.8	3105.3	3106.7	2998.1
石墨	10^4 t	61.1	64.3	65	64.0	66.9	62.1	67.2	63.2
石膏	10^4 t	7100	9267	9622	9857	9778	9396	9778	9800
重晶石	10^4 t	753	460.7	556.1	572	563.3	568.4	543.6	
萤石	10^4 t	500	460	528.2	569.6	513.1	407.7	384.6	386.1
石棉	10^4 t	470	430.4	429.2	426.8	403	386.3	380.9	
滑石④	10^4 t		849.8	881.1	923.9	941	900.1	886.4	
高岭土	10^4 t	1980	2120	2320	2300	2290	2200	2300	2330
硅藻土	10^4 t		161.1	167.2	166	162.9	155.6	158.1	150
膨润土⑤	10^4 t	685	928.3	904.6	955.8	924.2	900.8	852.4	
金刚石	10^4 克拉	4721	9070	9873	9850	10670	9920	10100	10085
菱镁矿	10^4 t	1139	1871.6	1898.7		1941.4	1884.6	1610	1470

说明：①精矿；②纯硼砂；③天然碱＋合成碳酸钠，除中国外；④包括叶蜡石；⑤除中国外。

（据世界金属统计年报，1995）

表 6.12 中国探明矿产储量潜在价值在世界上的位次

国家	潜在总值 亿美元	世界排名	人均潜在总值 万美元	世界排名	1 km² 潜在总值 万美元	世界排名
美国	298392.750	1	12.017	19	318.387	17
原苏联	218478.538	2	7.565	25	97.525	34
中国	165616.624	3	1.511	53	172.513	24
南非	89054.095	4	25.664	10	729.322	10
澳大利亚	66250.270	5	41.406	5	86.238	39
沙特阿拉伯	53566.010	6	38.180	7	239.134	20
加拿大	52639.986	7	20.092	14	52.767	57
德国	47823.643	8	5.933	28	1339.425	6
印度	39057.621	9	0.425	92	118.815	31
英国	31393.032	10	5.527	30	1286.056	7
全球	1377228.735		2.604		92.122	

（据朱训，1999）

表 6.13 世界上几种金属的消耗情况（年增长率，%）

国家类型	期间	钢	Al	Cu	Pb	Zn	Ni
欧洲经济合作组织	1960～1973	5.3	9.7	4.6	3.5	5.3	6.6
	1973～1979	−1.4	1.3	0.6	3.2	−1.8	1.1
	1979～1992	−1.0	0.9	0.9	−0.3	0.7	0.2
发展中国家	1960～1973	8.3	13.8	5.7	7.0	6.5	21.7
	1973～1979	8.0	12.9	9.9	9.7	7.4	7.9
	1979～1992	2.6	5.7	4.6	3.1	3.1	9.1
经济过渡国家	1960～1973	6.1	8.1	5.4	5.5	6.2	5.2
	1973～1979	3.7	4.5	4.2	3.8	3.1	4.7
	1979～1992	−1.0	0.7	−1.0	−5.7	−3.0	−2.1
全世界	1960～1973	5.8	9.6	4.8	4.2	5.6	6.4
	1973～1979	1.2	2.7	2.0	4.0	0.4	2.2
	1979～1992	−0.2	1.4	0.9	−0.8	0.3	0.3

（据世界金属统计年报，1994）

农用矿物中硫、磷、钾产量在80年代随化肥需求量的增长而增长，特别是在东亚、拉美。90年代以来，需求量有所下降，如硫1993年产量6877.5万t，与80年代中期持平；磷1993年产量仅与70年代中期持平，为1×10^8 t左右；钾1992年产量甚至低于1975年水平，仅2390.5×10^4 t。这几种矿产品的贸易也有同样发展趋势，其资源保障程度都比较高。

表6.14 1992年一些矿产品的人均消耗量

国家	人口 10^4	石油 t	钢①	Al	Cu	Pb	Zn	钾肥②	磷肥③
			kg						
美国	24826	3150	412.8	18.6	8.8	5.0	4.2	18.4	15.4
日本	12354	2090	801.6	18.6	11.4	3.3	6.3	49.4	63.5
德国	8060	1670	490.7	18.1	12.8	5.1	6.6	9.0	6.4
英国	5740	1440	290.8	8.4	5.4	4.6	3.3	7.7	6.5
法国	5620	1680	321.6	12.9	8.7	4.4	4.6	30.9	22.3
原苏联	28672④	1160	545.5	7.5	3.1	0.9	1.4	16.3	20.0
中国	112200	110	61.3	1.1	0.8	0.2	0.5	1.9	6.3
印度	82700	70	26.2	0.5	0.2	0.07	0.2	1.6	4.1
巴西	14610	410	69.8	2.6	1.1	0.5	0.7	8.3	8.5
韩国	4320	1650	501.2	9.2	8.2	3.8	6.2		4.7
全世界	515000	610	152.0	3.6	2.1	1.0	1.3	4.4	6.5

说明：①1990年消耗量；②1991年，K_2O量；③P_2O_5量；④1989年。

值得注意的是，非传统农用资源的开发利用已引起各国重视，有30余种矿物岩石在牲畜和家禽饲料添加剂、肥料、土壤疏松剂和水载物质、液态肥料载体、土壤改良剂等不同领域得到广泛应用。

铁与铁合金金属，70年代世界钢铁产量持续上升，80年代以来呈下降趋势，1985年较之1979年产量下降4.65%，多数发达国家单位国民总产值钢消耗量下降40%～50%，近几年全球年平均钢产量74596×10^4 t，而1993年为72530×10^4 t，呈波动下降，但合金钢变化不大，不锈钢年递增2%～3%。中国铁矿石产量1993年已达2×10^8 t，居世界首位，占世界铁矿石总产量的20%以上。全世界再生钢产量达3.2×10^8～3.4×10^8 t，占当年产量的40%。较之70年代末，80年代多数铁合金元素产销量也处于停滞或下降状态，Mn下降10.37%，W下降3.34%，Mo下降5.1%，V下降14.56%，而稀土上升52.56%，铬上升2.4%，镍上升14.9%，钴上升21.2%。

80年代以来有色金属中除铝、镁、钛等轻金属外，多数产销近于停滞或下降。铜1995年世界总储量3.1×10^8 t，储量基础大，近年精炼铜年均产量1080×10^4 t左右，回收废铜420×10^4 t，年均消费量超过1000×10^4 t，预计今后10年铜需求量的年增长率1.5%～1.9%。铅和锌的消费和产量都有逐年下降趋势，铅年均产量541×10^4 t，消费506×10^4 t，锌年产平均680×10^4 t，消费量670×10^4 t，铅锌资源保证程度较高，铅1.5×10^8 t探明储量，锌1.4×10^8 t探明储量，可以满足40～50年的需求，铅在环保方面遇到了严重挑战。Ti、Sn、Sb产销基本平衡，平均年产量分别是381×10^4 t，19×10^4 t和48608 t，锑年产40%是由中国生产，资源保证程度较高。世界贵金属年产量持续增长，政府和个人储备欲望较高，高新技术的需求殷切，年平均用量增长7%。世界黄金资源总量75000 t，15%～20%为伴生，已采出112000 t，其中15%已损耗，余下95000 t，官方储备36000 t，私人持有59000 t，近年来黄金勘探和开采是矿业界投资热点，年均产量已达2049 t，价格不稳，波

动较大。贵金属的地理分布不均，南非、独联体、美国、澳大利亚、加拿大、巴西等国储量和开采量都相对较为集中（表 6.15）。中国是亚洲黄金需求量最大的国家，1992 年需求量 350 t，比 1991 年增长 47%，其次是印度 293 t，美国 132 t，日本 104 t，沙特阿拉伯 151 t，中国台湾 160 t，马来西亚 99 t。世界银储量仅 28×10^4 t，年均产量 8000 t 左右，仅能满足需求的 58%～68%，由于电子工业、影像业的快速发展，已连续多年供不应求，资源保证程度也不高。铂族元素资源总量约为 10×10^4 t，探明储量 5.6×10^4 t，年产量约 258 t，西方国家消费年均约 115 t，市场供应和资源保证程度都较高。

表 6.15 世界金的产量

单位：t

国 家	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
南非	638.2	601.8	619.0	605.5	600.8	601.0	608.5	619.5
美国	116.1	154.5	200.9	200.9	294.5	294.0	330.0	331.0
澳大利亚	75.1	110.7	157.0	202.2	254.6	236.1	243.4	248.1
原苏联	273.0	260.0	277.6	304.0	302.0	220.0	226.0	220.0
加拿大	102.9	117.2	135.9	159.5	169.4	176.6	161.4	152.9
中国	80.0	88.0	96.0	100.0	100.0	110.0	140.0	160.0
巴西	67.0	84.0	100.0	70.0	101.9	89.1	88.8	77.0
巴布亚新几内亚	34.8	34.0	37.7	31.1	31.6	60.8	71.2	60.6
哥伦比亚	39.8	26.5	29.0	29.5	29.4	34.7	32.1	27.4
智利	17.9	17.0	20.6	22.6	27.5	28.7	30.0	33.5
加纳	8.9	10.2	11.6	13.4	16.8	26.3	33.3	41.4
菲律宾	24.0	32.6	35.3	30.6	24.6	24.9	24.8	15.8
津巴布韦	14.9	14.7	15.0	16.0	16.9	17.8	18.3	18.8
印度尼西亚	3.1	3.0	3.5	5.2	10.7	17.0	38.0	41.6
其他国家	41.0	39.7	43.4	67.0	97.0	92.7	92.0	95.4
世界总计	1541.3	1601.5	1782.5	1857.5	2077.7	2029.7	2137.8	2143.0

（据世界金属统计年报，1995）

稀散元素虽用量少但是高新技术领域必不可少的原材料，被广泛用于电子工业、军事工业、航天工业、化学工业、冶金工业等。据日本后滕左吉教授预测 21 世纪初，世界对稀散金属元素的需求将成倍、成十倍、甚至某些元素成百倍的增长。稀土（REE）产量 65755 t 年增长率 5.7%，消费量以近 10%的速度增长，特别是单一稀土，用途前景广阔，稀土储量达 1×10^8 t，80%分布在中国，其次是美国、印度、独联体，资源保证程度较高。

非金属及建材原料，不少人都把非金属产值超过金属矿业产值作为一个国家工业成熟的标志。70～80 年代世界经济萧条时期，虽金属矿业受较大冲击，但非金属产值所受影响很小，价格波动不大，稳中有升，而且非金属矿物应用的深度和广度也有较大发展。非金属材料对传统金属材料领域起到替代品的作用，并且能够提高产品技术性能，硅代替钢，代

替锗，陶瓷代替钢材；橡胶、造纸、油漆、塑料亦需大量填料和新型建材等。非金属原材料的重要特点是深加工产生高附加值。如膨润土酸化成有机膨润土，价值由 28.6～30.5 美元/t 升值为 2400～2600 美元/t，未磨的重晶石块矿加工成用物重晶石粉价格由 40 美元/t 上升为 2560 美元/t。

金刚石因澳大利亚找矿的突破而产量大增，80 年代前五年产量翻了一番，达 8960 万克拉，以后仍以 6%的年均增长率上升，近 30 年价格稳步上升，世界金刚石销售总额 64.14 亿美元。至 1994 年世界金刚石保有储量 9.8 亿克拉，宝石级与准宝石级 3 亿克拉，资源保证程度不高。

轻质建材、新型水泥、陶瓷等领域，对非金属材料的应用都有较大进展，建筑砂石和石材是用量极大的非金属材料。

中国的矿产资源总量较大，占世界第 2 位，但人均很低，仅为世界的 80 位，为世界人均 58%，矿业总产值占世界前 3 位。中国矿产资源有如下特点：品种齐全、配套程度高；探明矿产储量总量丰富；单位国土面积矿产资源丰度高；有 20 余种优势矿产资源在全球占重要地位。各矿种虽贫富都有，但大宗矿产品贫矿较多，我国矿产资源形势喜忧参半，资源勘查工作成效显著，而且资源潜力较大，但老矿山多，接替探明后备资源不足，同时开发利用中由于技术落后，设备陈旧、资源利用率不高（表 6.16、6.17）。

表 6.16　1996 年中国主要矿产品产量在世界上的地位

品　种	单　位	全球产量	中国产量	中国占世界比例/%
煤	10^8 t	46.07	13.50	29.3
石油	10^8 t	31.68	1.5	4.7
钢	10^8 t	7.505	1	13.3
铁矿石	10^8 t	10.13	2.5	24.67
十种有色金属	10^4 t	5718.75	529.67	9.26
金	t	2130	121	5.6
稀土氧化物	t	65335	30000	45.9
磷矿石	10^4 t	14343.6	3106	21.65
萤石	10^4 t	389.2	190	48.81
滑石	10^4 t	720.0	240.0	33.33
重晶石	10^4 t	532.8	177.04	33.2
硅灰石	10^4 t	42.0	23.0	54.76
石墨	10^4 t	72.0	35.0	48.61

（据朱训，1999）

表 6.17　中国主要非金属矿产储量与产量（1990）

矿种		储量单位	储量	产量 10^4 t	矿种		储量单位	储量	产量 10^4 t
冶金辅助原料	菱镁矿	矿石 10^8 t	28.1	650 (1988)	建材原料与其他	硅灰石	矿石 10^4 t	9000	＞7
	萤石	矿物 10^8 t	1.3	165		滑石	矿石 10^8 t	2.5	254.5
	耐火粘土	矿石 10^8 t	20	＞1000 (1988)		石棉	矿物 10^4 t	8800	22.1
化工原料	硫	S 10^8 t	14	1274 (硫标矿 S35%)		云母	矿物 10^4 t	7.0	工业云母 1000 t (1988)
	芒硝	Na_2SO_4 10^8 t	155	Na_2SO_4 ＞100		沸石	矿石 10^8 t	9.5	250
	重晶石	矿石 10^8 t	3	＞300		石膏	矿石 10^8 t	570	1018
	天然碱	Na_2CO_3 $+NaHCO_3$ 10^4 t	6000	1.4		水泥用灰岩	矿石 10^8 t	390	水泥 2.1 (10^8 t)
	钠盐	NaCl 10^8 t	3645	2023		玻璃硅质原料	矿石 10^8 t	40	硅质原料 ＞1000
	钾盐	KCl 10^8 t	3.96	KCl 约 5		硅藻土	矿石 10^8 t	2	10 (1989)
	硼	B_2O_3 10^4 t	4400	标矿 60 (B_2O_3 12%)		高岭土	矿石 10^8 t	8	92
	磷矿	矿石 10^8 t	157	P_2O_5 647		膨润土	矿石 10^8 t	24	160
建材原料与其他	金刚石	矿物 kg	数千	20 kg		珍珠岩	矿石 10^8 t	2.6	25
	石墨	晶质石墨矿物 10^4 t	15000	石墨矿物 67.89		大理石	矿石 10^8 m^3	10	板材 705 (10^4 m^2)
		隐晶质石墨矿物 10^4 t	4800			花岗石	矿石 10^8 m^3	8	板材 574 (10^4 m^2)

6.3 水资源与人类社会发展

地球上水资源是丰富的，但多为含盐的水。据估计其总量约为 14 亿 km^3。

水资源的分布是不均衡的，受自然地理条件影响大，不仅地理分布差异大，季节分布也是极不相同的（表 6.18）。当今世界不少国家之间的冲突也起因于对水源分配的矛盾。1990 年统计共有 28 个国家的 3.35 亿人处于严重缺水之中。1940～1990 年世界人口从 23 亿增至 53 亿，同时人均用水量也从 400 m^3/（人·年）翻一番成 800 m^3/（人·年），而全球可再生淡水上限为 9×10^6～14×10^6 km^3/a，这就是产生缺水和闹水荒的人口越来越多的原因。

表 6.18 几个国家水资源比较

国　名	巴西	原苏联	加拿大	美国	印尼	中国
水资源量/10^8 m^3	51912	47140	31220	29702	28100	27114

（全国农业区划委员会，1987）

淡水水源主要来自大气降水，全球年均 110×10^{12} m^3/a，扣除蒸发，存于地表及地下浅层的淡水约 40×10^{12}～50×10^{12} m^3/a，人均水资源量 9000 m^3/a，而中国淡水资源量为 2.8×10^{12} m^3/a，人均 2300 m^3/a，名列全球国家排序的 110 名之后，属淡水资源相对贫乏的国家（表 6.19）。淡水资源分布的不均匀性在中国也十分突出，南北差异，东西不同。中东地区尼罗河、约旦河、幼发拉底—底格里斯河流域人口年增长率 3%，水资源的紧张已十分明显，节水技术显得十分重要。

表 6.19 中国主要平原地下水资源量

序　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
地　区	黄淮海平原	松辽平原	三江平原	关中平原	山西六大盆地	内蒙古河套平原	河西走廊	柴达木盆地	成都平原	雷琼地区	银川平原	天山北麓山前平原
总面积/10^4 km^2	32	25.5	10.35	2.01	3.36	2.28	1.69	25.34	2.5	1	1.71	123
地下水资源量/10^8 m^3	476	693	151	46	64	43	49	27	40	97	20	127

（全国农业区划委员会，1987）

水资源的开发对国民经济发展具有举足轻重的作用，是实现可持续发展的重要条件。传统认为水资源是取之不尽，用之不竭的，可以无限满足人类的不断增长的需求。人类的社会经济行为必需建立在可再生水资源量、环境的承载力、自然生态的恢复速度等要素的相对平衡上，即严格遵循自然法则，研究各个地区的可再生资源和可恢复环境资源的最大可持续发展保证程度，寻求一个平衡点，即既保证当代人类的生活水准提高，又不影响后代

们的发展条件。比如中国人均水资源量仅为世界平均的 1/4，而农田浇灌水的有效利用率仅 25%～40%，还可提高 20%～30%；工业用水重复使用率仅 20%～30%，还可提高 30%～40%。我国自然条件决定了水资源紧张的局面是一个长期的制约因素，而我们正处在高速工业化的时期，因此选择一条适合我国国情的资源组合方式，建立一个低度消耗资源的节约型国民经济体系，促进水资源的合理开发利用，降低消耗，杜绝浪费，缓解供需矛盾，以增强水资源对国民经济发展的保证程度。

据估计，全世界居民总供水量 1900 年为 200×10^8 m^3，1975 年 1470×10^8 m^3，2000 年将达 4400×10^8 m^3。

农业部门用水最多，一般来说，1 公顷水浇地需水：欧洲为 4000～6000 m^3，美国和墨西哥 7500～8500 m^3，印度和印尼 9000～10000 m^3。本世纪全球农业用水扩大了近 10 倍。

工业用水增长迅速，生产 1 t 钢用水 1500 m^3，1kg 纸 300 m^3，1kg 合成橡胶 2000 m^3，一个 100×10^4 kW 的热电站，每年需用水（12～16）$\times10^8$ m^3，相当于一条流量为 40 m^3/s 的河流的供水量，而原子能发电站需水量为普通热电站的 1.5～2 倍，20 世纪以来工业用水增加了约 60 倍（表 6.20）。

表 6.20　1900、1940、1975 及 2000 年全世界消耗的水量　　单位：km^3/a

需水量	1900	1940	1975	2000
居民供水	20	40	147	440
工业	30	120	633	1900
农业	350	660	2074	3400
水库	0	2	112	240
总计	400	822	2966	5980

（据阎玉龙，成松林，1986）

水资源的有限和工农业用水，居民用水的急剧增加造成了水资源的紧张和过量采水的一系列环境问题，特别是地面沉降，我国东部一些大中城市如京、津、沪、西安、太原、苏州、无锡等 30 个城市沉降显著；大连、宁波等城市因过量采水而造成海水入侵和淡水层咸化。华北、西北等地因灌溉方式不当而造成大量可耕地的盐碱化。河水的过量抽取造成断流，黄河是中华民族的母亲河，近年来，每年都有几个月断流，而且其断流时间越来越久，断流河段越来越长。中国地下水过量开采已形成 56 个区域性漏斗，总面积达 8.7×10^4 km^2。地下水位下降在有些地方引起土壤干化。美国圣华金河谷有大约 35000 眼井开采地下水，抽水量为补给量的 2.5 倍，地下水位每年降低 2.3 m；加利福尼亚州因地下水位下降，海水侵入沿海 13 个含水层，54 万亩良田变成盐碱地；莫斯科地下水位下降 40～60 m；日本发生地面沉降的有 35 个地区。

水资源的污染有工业、农业、生活和矿山污染，工业的废水、废渣、废气排放，造成某些元素直接、间接进入地下水和地表水体，并逐渐积累下来，如 Hg、Cr、As、Cd、F、Mn、Pb 及氰和苯酚等化合物；农业施用的农药化肥，使一些有机磷、有机氯、Cd、B 等过量积累在地下水中，矿业开发中不少重金属元素和选矿药剂也进入水体之中；人类生活中

排放的生活污水、垃圾、排泄物、医药排放物等造成了地下水被酚、硫、有机物及细菌病毒污染，据联合国有关部门统计，人类活动每年把 6×10^4 t 石油、6×10^4 t 清洁剂、100 t 水银，3800 t 铅，33600 t 磷酸盐排入地中海。水体的污染不但会给人类生活造成影响，危害人类健康，也会影响工业生产，造成产品不合格，而且水体污染后在较短时间内难以完全恢复原状，有些污染物的分解需要很长时间，并能通过生物逐渐富集起来，危害扩大。有些物质在生物体中的聚集会造成致命的后果，如甲基汞危害神经，Cr、As 都可以致癌，Tl 引起脱发，缺 Se 引起克山病，缺 I 引起甲状腺肿等。由于水体的污染使一些可饮用的水资源变成不可饮用，甚至不能作农业用水和工业用水。

水资源的合理科学管理和使用是人类摆脱缺水的最重要途径。污水处理，达标排放，循环使用保护生态环境，治理污染源，维护水资源的持续利用，以丰补涸，淡化海水，大力开展节水，搞好水资源开发利用规划，建章立制，完善法规和管理体制，采用先进科技成果加强监测等。对于因地下水过量开采而引起的环境地质问题，则应采取以防为主，防治结合，综合治理的方针。

6.4 地质灾害、环境保护与人类生存

正常年景，全球自然灾害的经济损失是 600 亿美元，12000 人丧生，而且有不断增加的趋势。有关的经济损失 1990 年为 470 亿美元，1992 年 630 亿美元，1994 年 650 亿美元，1995 年达 1800 亿美元（因日本阪神大地震）。中国每年都因地质灾害而损失 500 亿～600 亿元和近万人丧生。

地质灾害是在自然或人为因素作用的影响下形成的对人类生命财产造成损失的地质作用。如崩塌、滑坡、泥石流、地震、火山、水土流失、海水入侵、土地荒漠化等。滑坡、崩塌、泥石流是最常见的地质灾害。

崩滑流分布在中、日、美、印、瑞（士）、秘鲁、哥伦比亚等国，日本 5584 处，总面积 1433 km^2（表 6.21）。瑞士 20 世纪已有 5000 人死于此种灾害，美国在 70 年代就因此而损失 10 亿美元，20 世纪最大的两次崩滑流都发生于安第斯山区，共死亡 4.8 万人，摧毁小城市 2 座。中国也属崩滑流特别发育的国家，灾点达 41 万多处，有特大型崩滑点 191 处，泥石流 149 处，较大型的崩滑、泥石流点 7473 处，在川、藏、甘、滇等地共有 10 余万条山沟有泥石流发生。全国有 70 余座县城处于这种灾害的威胁之下，崩滑流多在山区发育，影响总面积 173.52×10^4 km^2，占我国国土面积的 18.10%。其危害极其严重，造成人员伤亡，毁坏村镇、农田道路和基础设施，特别是对铁路交通的破坏尤甚，每年都有发生，平均每年经济耗费达 7000 余万元，仅 1981 年宝成铁路修复费用就高达 3 亿元。对电力设施的破坏也是惊人的，1989 年云南漫湾电站滑坡损失 10 亿元。

地震灾害是对人类威胁最大的地质灾害。1900～1990 年全世界共有 260 万人死于地震，其中万人以上的 27 次。中国处在全球两大地震活动带交接处，震灾特别严重，20 世纪来共死于地震 115 万人，占总死亡人数的 44.2%。全球死 10 万人以上的 8 次大震，4 次发生在中国，1976 年唐山地震就死亡 24.3 万人。最近发生在张北地区的 6.2 级地震中有 50 人死亡，1000 多人受伤，而且地震常伴以火灾、海啸、滑坡、风暴、洪水、雪崩等，加重灾情（表 6.22），地震虽可预报，但短期预报的成功率不高，所以震灾有突发性，隐蔽性的

表 6.21　国内外部分典型"滑崩流"状况

类型	国家（地区）	地　点	时间	变形方量 m³	死亡人数 名	诱发原因	损失状况
滑坡（个别伴有崩塌及泥石流）	墨西哥	瓦哈卡州卢斯市	1990.8.19		14(失踪5名儿童)	暴雨及山洪	埋没大片房屋
	香港	九龙新界观塘秀茂坪	1972.6.18		138	暴雨	撞坏大厦两座及房屋数间
	日本	神户市区北	1938.7.3		死伤 616	暴雨	
		本州岛北部的奥羽铁路干线	1910.8			暴雨	中断火车1年4个月
	中国	青海省共和县查纳村	1943.2.7	1.27 亿	114		毁2村庄
		陕西汉中地区（群发滑坡1万多起）	1981.8		183	特大暴雨	毁铁路、公路基分别2、4条，倒塌房屋1.6万多间
		甘肃东乡族自治县果园乡洒勒山	1983.3.7	6000 万	220	雷击	埋没4个村庄
		湖北新滩	1985.6.12	3000 万	10(伤8)		毁镇1个，毁船77艘
		四川华蓥山	1989.7.10	100 万	293	暴雨	毁村1个，企业6家
		云南昭能	1991.9.23	>240 万	216(伤7)	雨水	近100万元人民币
崩塌		金沙江鲁车渡	1935.11.24		280		
		金沙江普福河	1965.11.22	4 亿	444		4个村消失
		湖北盐池河	1980.6.3	100 万	307	雨水，采矿	摧毁年产8万吨磷矿石的矿区一座
		四川巫溪县	1987.8.1	>4000	98		毁楼房几座
		四川巫溪县	1988.1.10	数百万	>10		毁区公所、中学及74栋房屋
泥石流		西藏波密县古乡沟上游	1953.9.25	1100 万		高温，雨水	毁坏森林、农田
		陕西紫阳县燎原乡安寺沟	1979.7.14		21		
		四川雅安市及天全县	1979.11.2		164	暴雨	良田、村庄、工厂、桥梁、公路等毁坏
		四川甘洛县利子依达沟	1981.7.9	>60 万	伤亡 300 多	暴雨	冲断铁路大桥，毁坏火车
		辽宁老帽山	1981.7.26～28		610	雨水	毁田4万亩，工厂3个，村1个，房多间（5亿元人民币）
		云南东川市因民区黑山沟	1984.5.27	>36 万	121，伤 34	暴雨，采矿	1100万元人民币
		甘肃武都市	1984.8.3			雨水	倒房1.32万间，1.12万人无家可归
		四川杂谷脑	1985.4.25			雪水，雨水	冲毁公路
		辽宁岫岩县	1987.8.19		58		1.4亿元人民币
		西藏与尼泊尔交界处	1981.7.11		200	冰水	破桥毁村
	土耳其	特拉布宗省马卡厅	1988.6.23		300		数十辆汽车及建筑物
	日本	九州岛长崎县	1982.7.23		299	特大暴雨	毁林破堤摧屋
		本州岛岛根县及山口县东区	1983.7.22		117	大雨	10亿美元
		本州岛岐阜县	1968.8.18		104	暴雨	
	原苏联	原苏联天山北坡	1921.7.8	300 万	>500	冻川崩解	摧房破路
	新西兰	鲁阿佩胡火山	1953.12.24		多人	冰雪崩解	破坏公路牧场
	秘鲁	容加依城	1970.5.31		2.3 万	7.7级地震	容加依城被毁灭
	加拿大	魁北克圣让地区	1971.5.4	6.9 亿	31	雨水	毁坏掩埋住舍

表 6.22 全球典型地震及其损失情况表

国家（地区）	时间	震级（里氏）	震中	波及城市	死亡人数名	损失情况
美国	1906.4.18	8.3	加利福尼亚州中部，震中烈度 11 度	旧金山	6 万多	地震诱发火灾燃烧 3 天 3 夜，毁房 2.8 万栋，财产损失 3.5 亿美元（约合今 50 亿美元）
智利	1906.8.16	8.6	南纬 40°太平洋海底	科金博、拉塞雷纳、奥瓦利等	2 万	引发海啸造成损失
	1939.1.24			奇廉城、康塞普西翁等	2.8 万	大量房屋等被毁
中国	1927.5.23	8	甘肃古浪县（11 度）	兰州、金塔县、永昌等	5 万	
	1933.8.25	7.5	烈度 10	成都市、灌县等	1 万多	淹没 60 多个集镇、村寨、毁田 513 公顷等
	1950.8.15	8.5	中国西藏墨脱（11 度）	印度阿萨姆邦	约 1 万	损失牲畜 1.77 万头，等等
	1970.1.5	7.8	云南通海县		15621	伤残 32431 人
	1976.7.28	7.8	唐山市（11 度）	北京、天津	242769	重伤 164851 人，损失 196 亿元人民币，救灾重建又付出 106 亿元人民币
	1920.12.16	8.5	宁夏海原县（12 度）	北京、上海、太原、开封	23.4 万	损失惨重
意大利	1908.12.28	7.5	墨西拿市	勒佐卡拉布里亚市	8.3 万	毁掉 45 个村庄及勒佐卡拉布里亚市
	1915.1.13	7.5	阿韦察诺市	罗马	29980	山城夷为平地
日本	1923.9.1	8.2	关东	东京、横滨、千叶等	14.3 万	28 亿美元（现值 300 亿美元以上）
印度	1934.1.15	8.3	比哈尔邦	木扎法普尔、伯甘吉（尼泊尔）等	10700	
巴基斯坦	1935.5.31	7.5	奎达		3 万	奎达城被毁灭
土耳其	1939.12.26	7.9	埃尔津詹		32741	埃尔津詹市毁灭
阿根廷	1944.1.15	7.8	圣胡安		1 万	伤 1 万人，城市被夷为平地
土库曼	1948.10.5	7.5	阿什哈巴德		1 万多人	城市全部被毁坏
摩洛哥	1960.2.29	5.9	阿加迪尔		1.6 万	该城被毁灭
伊朗	1962.9.1	7.1	加兹温	德黑兰	12230	城市一半房屋损坏，交通中断
	1968.8.31	7.4	霍拉桑省		1.2 万	伤数万人，若干镇村被毁
	1978.9.16	7.7	塔巴斯		2.5 万	40 个村被毁灭，60 个村被严重破坏
	1990.6.21	7.3	罗马德巴尔	吉兰省、赞詹省	5 万	80 亿美元
秘鲁	1970.5.31	7.7	钦博特	楚基卡拉、瓦康卡等	66794	5 个城市损毁，伤 10 万人
尼加拉瓜	1972.12.23	6.2	马那瓜		1 万余	伤 2 万多，建筑物损失 7 亿美元
危地马拉	1976.2.4	7.9	太平洋沿岸		22778	房屋损毁严重
阿尔及利亚	1980.10.10	7.3	谢利夫		2 万多	伤 6 万人，80%建筑物被摧毁
墨西哥	1985.9.19	8.1	太平洋底	3 个州及首都墨西哥城受到波及	3.5 万	伤 4 万多人，经济损失 50 亿美元
亚美尼亚	1988.12.7	6.9	列宁纳坎（10 度）	殃及 40%的领土及 30%的人	24972	伤残 1.9 万人，经济损失 100 亿卢布

表 6.23 全球部分火山活动及其危害一览表

国家（地区）	时间	地点	波及范围及城市	死亡人数名	损失情况
危地马拉	1902.4.8	圣玛丽亚火山	数百平方公里土地	1000	摧毁村落
加勒比海	1902.5.8	马提尼克岛	全岛及其近海	3万	圣皮埃尔城毁灭，17艘远洋轮船及众多木船、小艇焚毁
	1902.5	圣文森特岛	毁灭半个岛屿	2000	毁坏大半耕地等
	1979.4.12～25	圣文森特岛		无伤亡	农业损失严重
菲律宾	1911.1.30	塔尔火山	5000km²	1400	摧毁塔尔湖周围村镇
	1965.9.28～30	塔尔火山	60km²	数百	
	1991.6.9	皮纳图博火山	260万km²	800	伤300多人，毁房3.7万间，掩埋良田数千公顷，农作物损失价值3.75亿美元
美国	1912.6.6	卡特迈火山	>7800km²		无经济损失
	1980.5.18	圣海伦斯火山	>390 km²	60多	25亿美元
印度尼西亚	1919	克卢德火山	勿达里氏	5500	104个村庄被毁灭，数万顷农作物绝收
	1966.4.28	克卢德火山		282	摧毁9个村庄
	1990.2.10～12	克卢德火山		40	摧毁1个村庄
		默拉皮火山	毁灭了中爪哇的一个王国		埋没世界七大奇观之一的婆罗浮屠佛塔
	1930.12.18	默拉皮火山		7000	毁灭村庄多处
	1963.3.18	阿贡火山	整个巴厘岛	1600余	损毁村庄多处，桥梁5座，农田6万公顷
墨西哥	1943.2.20～1952.2.25	帕里库廷火山	24.8km²		吞没2个村庄并毁坏森林、农田
	1982.3.28	钦乔纳尔火山	>7000km²	数千人	破坏15万公顷土地，摧毁上万幢房屋及12个村庄
巴布亚新几内亚	1951.1.18	明顿火山拉		3000	毁灭村庄数个
扎伊尔	1977.1.6	尼拉贡戈火山	数十平方公里（包括戈马市）	2500	毁灭村庄、树林
意大利	1669	埃特火山		2万	毁灭13个村庄
	1979.9.12			6	伤30多人
	1981.3.17		卡塔尼亚飞机场		毁数百座房屋，60多公顷森林及葡萄园
哥伦比亚	1985.11.13	鲁伊斯	>30万km²	2.5万	吞没2个城镇，耕牛死15万头，农田、果园毁坏2万公顷，经济损失估计为50亿美元
喀麦隆	1986.8.21	尼奥斯火山		1746	3000多头牛丧生
日本	1991.6.3	云仙岳火山		39	摧毁房屋多间，村庄数座，工厂数家

表6.24 中国地面沉降情况

省(区)市	面积 km²/处	发育分布简要说明
上海	850/1	上海市地面沉降始于1920年,至1964年已发展到最严重的程度,最大降深2.63m,以后逐步控制,现处在微沉和反弹的状态
天津	10000/1	自1959年始,除蓟县山区外,1万多km²的平原区均有不同程度的沉降,形成市区,塘沽、汉沽3个中心,最深达2.961m,最大速率80 mm/a
江苏	379.5/4	自60年代初苏、锡、常三市分别出现,到80年代末累计沉降量分别达1.10、1.05、0.9m,目前已连成一片,最大沉积速率达40~50、15~25、40~50mm/a
浙江	262.7/2	宁波、嘉兴两市自60年代初开始,到1989年累计沉降量最大分别达0.346m、0.597m。现最大速率分别达18、41.9mm/a
山东	52.6/3	菏泽(1978年发现)、济宁(1988年发现)、德州(1978年发现)三市、累计沉降量分别达0.077m、0.063m、0.104m。最大速率分别达9.68、31.5、20mm/a
陕西	177.2/7	自50年代后期开始西安市及近郊出现7个地面沉降中心,最大累计沉降深达1.035m。最大沉降速率达130 mm/a
河南	59/4	许昌(1985年发现)、开封、洛阳(1979年发现)、安阳,最大沉降量分别:0.208m、不详、0.113m、0.337m、安阳为区域性沉降,速率65 mm/a
河北	3.6×10^4/10	整个河北平原自50年代中期开始沉降,目前已形成沧州、衡水、任丘、河间、坝州、保定-亩泉、大城、南宫、肥乡、邯郸10个沉降中心,沧州最甚、累计沉降深达1.131m、速率25.5 mm/a
安徽	360/1	阜阳市70年代初出现沉降、1992年最大累计沉降深达1.02 m,速率达60~110 mm/a
黑龙江	/4	哈尔滨、大庆、齐齐哈尔、佳木斯出现了房屋开裂、地面形变等地面沉降的前兆,它们均存在地下水超量开采地面沉降主发因素
山西	200/4	太原市(1979年发现),最大沉降量1.967m,速率0.027~0.114m/a,大同市(1988年发现)、榆次、介休最大沉降量分别为0.06m、不详、0.065m、速率分别为31、10~20、5~7.5mm/a
北京	313.96/1	自50年代末开始沉降,中心位于东郊,最大累计沉降量达0.597m,目前趋势减缓
云南	/1	昆明市火车站地段发现地面下沉
广东	0.5/1	60~70年代湛江市出现地面沉降,最大降深0.11m,后由于控制地下水开采已基本控制
海南	/1	90年代发现海口市最大沉降量达0.07m,目前还没造成危害
福建	9/1	1957年开始,福州市发现地面沉降,目前,最大累计沉降量达678.9mm,速率2.9~21.8mm/a
合计	48655.21/45	全国基本上发育在长江下游三角洲平原、河北平原、环渤海、东南沿海平原、河谷平原和山间盆地几类地区,年均直接损失1亿元以上

(据段永侯等,1993)

特点。中国地震活动频次高,强度大,城市受灾率高,全国Ⅶ级以上高烈度区面积达312×10⁴ km²,70%的百万人口以上大城市位于此区,特别是一批重要的城市如北京、天津、西安、太原、呼和浩特、昆明、乌鲁木齐、银川、拉萨、汕头则位于8级的高烈度地震区,至20世纪末,中国都是处于地震活跃期,加强地震预报,作好工程选址论证,可避免一些不必要的人员

和财产损失。

火山活动造成的地质灾害不如地震影响大，全球共有 850 座活火山，每年有 60 座左右喷发，3.6 亿人口受到威胁，本世纪共约 10 万人死于火山灾害，经济损失 200 亿美元（表 6.23），本世纪伤亡最大的火山喷发发生在印尼的马提尼克岛，毁灭了圣皮埃尔城，死亡 3 万人，中国火山活动较少，危害较小，火山喷发前一般都有明显征兆，通过监测和观察，可以作出准确预报，避免或减轻经济损失及人员伤亡。

地面塌陷多为天然成因人工诱发，分岩溶塌陷，采空塌陷和黄土塌陷。中国岩溶塌陷分布于碳酸盐岩区，如滇、黔、桂、川、湘、粤、鄂、冀、辽等省区，共有岩溶塌陷点 2841 处，面积 332.8 km^2，其中自然成因仅 30.4%，其余为人为因素诱发，多为矿坑输水或人工抽水造成，而且其比例越来越高，表现为突然、点多、影响范围不同，发育具连续性、重复性、分布集中，危害较大。安徽省每年直接经济损失 436.8 万元，辽宁省 5000 万元，云南 1000 万元，全国估计在 1.2 亿元，中国采空区塌陷主要发生在近 20 多年，多因采矿方案不合理，造成全国每年塌地约 70 km^2，直接经济损失 3.17 亿元，吉林采 10000 t 煤塌地约 1 hm^2。黄土湿陷主要发生于西北几省，每年经济损失 250 万元。总之，中国地面塌陷灾害有日渐加强的趋势，主要是人口压力大，工程项目多，地下水使用和排放不当，采矿的施工管理不严格。因此，健全法制，加强监管，合理开发，是最根本的治理措施。

地面沉降及地裂缝，多因过量开采地下水引起，也有因地壳运动和石油开采引发。河北平原有区域性整体沉降特点，有的连片达几千至上万平方公里；地裂缝分布规律性不强，长度数十至数百米，宽度几厘米至数十厘米不等，垂直落差多在几十厘米以内，主要由于抽排水，采矿，新构造运动，岩土体变形等因素造成。在西安、太原等地地裂缝与地面沉降同时出现，相互叠加，其危害尤大（表 6.24）。城市的高精度监测，科学地制订城市采用地下水的模型，以防为主，可减轻损失。

土壤侵蚀又称水土流失是一种累进性的地质灾害，它改变地表面貌，使肥沃表土流失，后果极其严重。全世界每年有 270×10^8 t 土壤流失，丧失地力的耕地达 500×10^4～700×10^4 hm^2。美国每年流失土壤 30×10^8 t，原苏联 5×10^8～6×10^8 t，中国 50×10^8 t，其中含氮磷钾 4000×10^4 t。中国水土流失面积 180×10^4 km^2，约占国土面积 18%，原苏联 50 年代末在中亚掀起的垦荒种粮运动留下了破坏表土，得不偿失的恶果，几十年过去了也未恢复，重复了美国 19 世纪中叶至 20 世纪初叶变中西部牧场为农场的错误。中国水土流失以大兴安岭—贺兰山—龙门山—横断山脉以东最烈，其中黄土高原水土流失面积达 43×10^4 km^2，侵蚀模数 8000 t/($km^2\cdot a$)，表层沃土每年冲蚀 0.1～2cm，水利工程使用年限极短，有的水库 4 年内即为泥砂填满，每年向黄河输泥沙 14.2×10^8 t，占黄河总泥砂量的 91%。水土流失与植被发育程度关系密切，植被的破坏是促成水土流失严重的直接原因。水土流失造成的经济损失，全国每年平均 96 亿元，水土流失导致可耕地减少，地力贫化、土层变薄、蓄水能力降低，也造成湖泊、水库、河道淤塞，减低经济效益，造林绿化、退耕还林，搞小流域治理，定会收到较好成效。

土地沙漠化是人类面临的又一挑战，全球干旱、半干旱面积占陆地的 1/3，由于过度放牧和开垦每年有 2100×10^4 hm^2 旱地沙化，其中 6000×10^4 hm^2 完全沦为沙漠，直接威胁着 3000×10^4 hm^2 的可耕地，而中国现有沙漠面积 15.33×10^4 hm^2，占国土面积 15.9%，每年仍以沙漠面积的 1.32% 的速度增加导致生态环境极度恶化，我国 60% 的贫困县集中分布在

沙漠区的附近，每年因风沙造成的经济损失高达45亿元人民币，沙漠化的加剧则是由于人为的不合理耕作和气候干燥多风的共同影响造成。我国三北防护林带的营造已经开始对抵御风沙发挥日益明显的作用。

土地盐碱化是因不合理灌溉、海水入侵等因素造成。全世界 14.7×10^8 hm² 耕地中有 3.8×10^8 hm²(26%)有不同程度的盐碱化。美国每年因此而损失1%耕地。中国盐碱化土地多分布在西北、华北地区，共 8.18×10^4 hm²，约占总耕地面积8.5%，每年因此而造成的经济损失25亿元人民币。因科学普及，近年来中国土地盐碱化发展已得到遏制。

其他地质灾害如海水入侵，水土环境异常(地方病)地下水水质变异(污染)和水位上升，坑道突水，瓦斯爆炸，煤层自燃，河湖及水库淤积，河海塌岸，冷浸田、水库渗漏、胀缩土、冻土冻胀融陷，砂土液化等虽是影响较局部的灾害，但若处置不当，也会造成严重的经济损失和人员伤亡。

地质灾害是各类灾害中发生频度高，影响范围广，经济损失大的事件，自古以来，人类一直在与自然灾害的斗争中生存和发展，20世纪以来，随着经济飞速发展，人们向自然界的索取不断加大，地质历史时期逐渐形成的生态环境平衡遭受到越来越严重的破坏，灾害类型越来越多，破坏性也越来越大，造成的经济损失也越来越严重，也就引起了社会的普遍关注。科学技术的发展，使人们对地质灾害的监测，预防和治理也有了高新的技术手段，地震、火山的预报工作已有了长足的进步，海水倒灌、地面沉降的治理已日益成效显著，滑坡、泥石流的监测也使不少生命财产免受劫难；沙化和洪水也逐步减少了对人类的威胁。1998年，中国长江和松花江遭到了百年不遇的洪水的袭击，但中国人民战胜了洪水，减轻了损失，这就给世人提供了战胜自然灾害的经验。

6.5 对策

人类对矿产资源、能源和水资源的需求随人口的增长和社会经济的发展而快速增长，而有限的资源是无法满足这种需求的无限增长的。加之人们在利用资源时耗损和浪费太大，特别是有些国家经济发展完全依赖于资源消耗，更加快了资源的危机。与之相伴的是资源消耗过程中大量废弃物的产生，如废液、废气和废渣、垃圾以及崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝、地面沉降和土地盐渍化、荒漠化等地质灾害，这就使人类的生活环境每况愈下。资源的耗竭和环境的污染无疑是一把双刃剑。如何选择好这一两难决策呢？

(1)加强全球、国家和地区的经济社会发展、资源需求和环境影响关系的研究，建立社会经济发展—资源供求—环境效应的调谐模型，求得三者的最佳平衡点，为政府决策提供咨询。

(2)加强法制建设。不少国家对资源利用、环境保护还未建立完整的法律体系。这就使得守法者无法可依，不守法者有空可钻。加之法律互相间配套不佳，使得执法过程相当困难。

(3)严格执法。管理部门和执法部门多头交叉管理，既有叠覆，又有空挡，加之执法中科学技术成果应用不够，影响了执法效果。

(4)科学普及和全民资源环境教育是最根本的长远之计。每年除利用“地球日”、“环境日”等开展大规模宣传活动外，应鼓励知名科学家多写科普文章，在中、小学教材中加入适当有关珍惜资源、爱护环境的学习内容。新闻媒体和社会团体都应以多种形式加强这方面的宣

传工作。

(5)政府在制定政策时,应着意鼓励节约资源、充分利用再生资源的产业和企业,对浪费资源和损害环境的产业和企业应加以限制。

(6)加强资源综合利用和保护环境的科学研究,提高技术水平,改造浪费资源、污染环境的传统产业。

(7)加强对地质灾害的观测和监测。防重于治,防患于未然。特别要注意缓滞型的地质灾害(如土壤、水体的有害化学物质的积累),以免重大地质灾害的爆发。

在这跨世纪的重要历史转折关头,人类正面临越来越严重的能源短缺,水资源危机,矿产资源日渐枯竭,自然灾害频繁,环境日趋恶化,人类社会持续发展所要解决的3大难题:人口、资源、环境,一个也没有得到缓解,这就是第三十届国际地质大会响亮地提出"资源、环境、减灾、发展"是当代地质学家要承担的社会责任的原因。这个责任较之他们的先哲们,更加严肃而广泛。继续探寻日益减少的矿产和能源,满足对水资源越来越多的需求,合理利用资源和土地,安全地处置各种废料,避免和减轻地质灾害的损失,提高人类生活质量,保护好人类社会可持续发展的绿色地球,是作为地球卫士的地学家们所要接受的挑战。

主要参考文献

马宗晋,陈玉琮等主编.1990.灾害与社会.北京:地震出版社.

中国地质矿产信息研究院主编.1993.中国矿产.北京:中国建材工业出版社.

刘宗超.1997.生态文明观与中国可持续发展走向.北京:中国科学技术出版社.

李金昌.1988.我国资源与环境.北京:新华出版社.

尚守忠,田世义.1993.水资源及其开发利用.北京:科学普及出版社.

陈耀邦主编.1996.可持续发展战略.北京:中国计划出版社.

张宗祜,任福弘,费瑾,朱延华.1995.开展中国大陆水圈演化研究,保护人类生存环境.地球学报,第1期,22~27.

张启人.1991.通俗控制论.北京:中国建筑工业出版社.

国务院研究室工交组.1993.九十年代中国能源工业发展走势.北京:石油工业出版社.

国家计委国土规划和地区经济司,国家环保局计划司,中国地质矿产信息研究院合编.1992.中国环境与发展.北京:科学出版社.

段永侯,罗元华等编著.1993.中国地质灾害.北京:中国建筑出版社.

晏同珍.1995.全球人口增长及其地质环境变化.地球科学,第20卷第5期,563~569.

黄宝松.1992.谈谈水资源危机.见:尹培基主编.天地纵横.北京:地质出版社,126~131.

谢军安.1995.人类持续发展的资源基础.河北地质学院学报,第18卷第4期,381~386.

Brown L R,et al.著,贾光禹译.1993.拯救地球.北京:科学技术文献出版社.

Bojorquez-Tapia L A,Ongay-Delhumeau E,Ezcurr E.1994.Multivariate approach for Suitability assessment and environmental conflict resolution.Journal of environmental management,41:187~198.

Eden S E.1994.Using sustainatle development.Global Environmental Change,4(2):160~167.

Fyfe W S.1994.The role of Earth's science in Society.Nature & Resources,30(3-4):4~7.

Loucks D P.1994.Sustainability impactions for water resources planning and management.Natural Resources Forum,18(4):263~274.

Mining Annual Review.London,Mining Journal Ltd.,1995.

Zhao Xun,Yin Jianzhao and Yang Yueqing.1996.Geosciences and Human Society.Beijing:Geological Publishing House.

Zhao Xun,Yin Jianzhao and Yang Yueqing.1997.Sustainable Geology-Sociogeosciences.Episodes,84~88.

第7章　地学发展优选方向

7.1　优选方向的选择

人类社会的需求是科学技术发展的动力和方向，地学的发展亦离不开这个前提，地学发展的优选方向必须考虑这个前提。

人类生活在地球上，地球在太阳系、银河系和宇宙天体中运行，人类社会从一开始就关心着世界的命运，有各种宗教色彩的设想，但都反映着共同的追求，即要了解自己赖以生存的世界的过去和未来。随着人类社会科学技术的发展，文明程度的提高，关心及探讨地球及天体的形成与演化，越来越受到社会各界的重视。回答人类赖以生存的地球是怎样形成的，将如何演化下去，太阳系、银河系、宇宙又是怎样形成的，向何方演变，在它们中还有没有适宜于人类生存的另一个“地球”？在天体中人类能否永恒地延续下去？因此，研究地球及天体的形成与演化方面的重大问题将是社会所需要的地学发展的优选方向之一。

人口、资源、环境是当今及今后人类社会可持续发展的关键问题。其中与地学直接有关的就有资源与环境。如何保证矿产资源（包括能源、金属、非金属矿产资源、水资源）的可持续发展，一些不可再生资源的耗竭和新的接替资源的发现，并且能不断地顶替，这需要地学的研究，提出成矿的有利地质环境、成矿规律，根据科技发展的新水平及新要求，不断开拓资源的新领域。有关资源及与资源有关的地学研究，必定亦将是社会需要的优先的发展方向。

保护环境已引起世界各国的重视，人类只有一个共同的地球，人类需要控制自己对环境的破坏，应当控制在自然可承载的程度之内。1992年在巴西里约热内卢举行的有183个国家参加的规模空前的世界人类环境会议，形成了对环境与发展统一的可持续发展的共识。地学不但要回答当前环境的形成规律、地质灾害的形成、分布与防治，还要回答全球地质环境的过去、未来，它们的变化规律，以及对人类社会的影响。显然，这是社会对地学界又一个紧迫要求，也是我们优选地学发展方向的依据。

对自然地质规律的研究，领域广阔，内容浩繁，必须优选重点，才能实践。优选重点必然与人类各历史阶段社会的需求、科技的基础相适应。目前，在面向21世纪，社会经济与科学技术将飞速发展、人类将进入信息时代的时期，社会对地球、天体、资源与环境方面的地学重大问题的需求将是放在第一位需要的层次，为人类社会赖以生存的地球的命运、为人类社会当前与未来可持续发展提供矿产资源与保护良好的环境，就是地学需要为之奋斗的研究目标，优选的发展方向。

根据以上的原则，提出以下地学发展的优选方向：①地球与宇宙起源研究；②地球的演化研究；③地球深部与内部研究；④全球岩石圈研究；⑤地质流体研究；⑥大洋地质与矿产资源研究；⑦矿产资源与开发；⑧水资源研究；⑨土壤和可耕地研究；⑩全球变化研究；⑪地质环境与地质灾害。

7.2 优选方向及研究内容

7.2.1 地球与宇宙起源研究

这是一个天文学和地学共同的研究方向，目前更多的是依靠天文学领域的研究。随着观察及测试技术手段的发展，这方面的研究已取得一批令人鼓舞的成果，但应当说还只是一个开始。对天体的研究目前还是以光波手段为基础，由各种口径的望远镜并配以多光纤光谱仪在运转，最大口径达15米级，已发现可测物体（可测对象温度为10^3K～10^4K级，如恒星、恒星集合体）约10亿个，用射电天文设备发现了射电天体约1万到10万个，用X射线天文设备及远红外天文卫星发现了天体约10万个，另外，巨型的"哈勃空间望远镜、γ射线空间天文台以及紫外天文设备"亦已开始启动，提供越来越多的天体数据。对宇宙天体研究的热点是：宇宙的起源；星系的诞生、演化；恒星的形成与演化；类星体；行星系统；暗物质、中微子、生命起源与地外生物系等。

20世纪天文学最大的研究成就是热大爆炸宇宙学及恒星演化理论的提出，形成了整体宇宙的物理模型。宇宙大爆炸的思想是由20世纪20年代哈勃发现星系光谱"红移"，说明三维的宇宙不断在膨胀而萌发，并在40年代末提出了宇宙大爆炸论点。在1965年彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙微波背景辐射，热辐射温度为$T=2.736$K，认为是宇宙早期原始火球高温平衡辐射留下的遗迹，获得了有利于存在大爆炸的证据。从天文观测表明：在恒星或星际物质中氦与氢的比例大体均为1∶3，这与原始宇宙高温状态下（$10^{10\sim11}$K）数量对等的质子、中子合成氢与氦的比例相当。这些事实使宇宙热大爆炸起源说被天文界广泛地认同，并按哈勃定律计算出大爆炸发生在大约150Ga之前，并推测当时的状况是高温（10^{11}K）、高密度的以质子、中子、电子、光子等基本粒子混合物构成物体，发生大爆炸，宇宙发生膨胀、温度不断下降，形成目前的宇宙。对宇宙大爆炸膨胀形成星系，再形成恒星，后变为类星体等演化以及宇宙中的各种元素与物质是在恒星形成与演化过程中逐步产生，越到后阶段形成的元素越重等的认识在现阶段在天文界趋向于共识。当然对宇宙的认识还仅仅处于开始阶段，宇宙大爆炸前的状况是什么，是怎样演化来的，以及众多的各种难题，还远不清楚。

地球与宇宙起源、演化研究实际上是属于一门被称为新兴的空间科学。空间科学是以地球系统、太阳系、银河系、局部宇宙、生命物质的起源和演化这些空间客体为对象，用新的手段和方法进行观察、测量、研究这些大自然的难题。并利用空间飞行器进行空间的科学实验，为人类社会的需要服务。地学界以所掌握的地学知识积极参与属于全人类的空间科学的探索是本职的任务，通过对地球本身的研究、对天外来客各类陨石、宇宙尘的研究，通过对月球、火星等人类已经和即将到达的星体的研究，通过与天文学家、天体物理学家的合作研究等来作出自己的贡献。对于这个研究方向，应当始终放在地学研究的重要位置，长期探索的目标，而不要因为其他重要的研究而忽视掉。因为，这是全人类最为全局性的共同所要探索的问题。

7.2.2 地球演化的研究

对地球的演化，特别是早期的演化，至今知之甚少。至今测得最古老年龄的岩石为3800～4000 Ma，而之前到4500 Ma的状况是什么？在这个阶段内地球留下了什么痕迹？这是一个非常值得探讨的问题。

目前我们接触到的地球是一个具有层圈结构的行星，从上向下为大气圈—水圈—生物圈—地壳—地幔—地核。而每一个圈内又有自己的分层结构，如大气圈由上向下又分出了磁层、电离层、热层、中层、低层。并且各个层圈内部都具有不同程度的不均一性，尤其是地壳、地幔的不均匀性比较明显，造成了壳、幔的运动、物质非均匀与聚集或分散。这种层圈的形成以及非均一性的存在是什么原因？是原始就有，还是后来演化而成？地球的演化究竟经历了几个阶段，板块运动从什么时候开始，之前又是什么性质的运动等。

欧阳自远对此提出了地球原始不均一性的认识，认为太阳星云凝聚形成不同化学组成的星子，在星云域内，地球胎吸积不同成分的星子，形成原始不均一的地球，这是地幔不均一性的起源，亦是形成地壳不均一性、成矿分布不均一性及地球构造两阶段演化（板块构造及板块前的构造）的原因。这方面的探索很有意义。这是一个十分诱人、又是一个十分重要的，带有根本性的地学问题，既涉及基础理论问题，又涉及社会的资源、环境问题。地球作为宇宙中一颗小行星，由于人类的存在，对其进行的地学探索和研究已经有了初步开端，当然越是要恢复小行星初始阶段的状况，可供追索的痕迹越少，难度越大，可越是关键，因为可能因此而揭示小行星的起源的奥秘，从而得到一些天体演化的共性规律。因此，地球早期阶段地质演化是地学研究很重要的方向。

在研究地球演化的问题时，对地外天体撞击事件对地球演化的影响亦是地学研究需要重视的问题。地球与其他星体一样受地外天体的撞击已是共识的事实。撞击对地球可能引起的后果有越来越多的推测，如改变地球自转轴的空间倾斜角，而改变地球气候带分布；使地球岩石圈分裂，导致板块出现；使地幔物质的熔融和玄武岩的溢流；超大陆的分裂，漂移，冲击角砾岩的大范围分布；全球生物灭绝和环境灾变；触发全球的构造运动和引起成矿作用；带来无机成因的有机物质，促进生命的演化等。为证实这些推测，收集到的证据在不断增加。虽然研究这个问题比较困难，因为地球地表部分受地球内外营力作用的影响，变化很快，撞击的直接痕迹较难保存，但是客观的事件，总会残留自己的遗迹。作为一个新的研究领域，对推进揭示地球演化的原因及过程无疑是很重要的。需要引起地学界的高度重视。

7.2.3 地球深部、内部研究

地幔、地核的研究已经受到地学界越来越多的关注，原因是地壳及岩石圈中物质运动，其动力学过程，其物质组分的变化、迁移、分散、聚集及相互作用都与地幔、幔核边界以及地核的结构运动、演变相联系。已经有足够的资料说明地幔物质在各处是不均一的，大陆区的地幔与大洋区的地幔成分有所差别。在大陆内不同构造区的地幔亦有差异的显示。地幔在不断地运动，并对岩石圈的运动起到非常重要的作用，有时是决定性的作用。例如，已经比较共识的洋脊扩张、板块运动与地幔的对流运动有关；大陆陆块内裂谷张开与地幔的垂向运动相联系，并有地幔物质上涌进入地壳；在大陆及大洋区一些特殊构造区存在上侵的地幔柱等。地幔的运动造成了地幔与岩石圈发生物质的交换，地球内部热的逸散，显然亦改变着地幔与地核的组成及促使其物、化性的演化。而对于岩石圈、水圈及生物圈，甚至大气圈的影响更为剧烈。大规模的地质构造运动、大规模的岩浆活动，特别是火山喷发活动，使地球表层，包括大气层发生激烈的变动，使其不断地演化。因此，地球表层的运动、结构的变化，物质组成的演化及重组，其关键性的动力是地幔、地核，亦就是地球深部的运动。当然地球表面的岩石、水域和大气层受到太阳能的作用，发生了各种表生作用，亦改变着地球的表层，但与地球深部的作用相比还处于次要的地位。因此，研究地球深部、内部的层圈及其运动是地学研究

的重要方向。

地球深部、内部的研究，目前地学界关注的重大问题是：地幔、地核的物质组成、状态、结构和运动；探讨其不均一的状况及原因；地幔与地核的运动形式，特别是地幔与幔核边界上的作用，它们对岩石圈的影响；地幔柱形成、侵位与对岩石圈及地壳的作用；地球深部物质状态的高温、高压实验研究；地球深部物质与状态与地球物理场的关联等。

从事这方面的研究有较大难度，只能求助于地球物理、地球化学探测技术和高温高压的模拟实验。应用宽频数字地震仪固定台网和可移动台网，通过对穿过地球的压缩波和剪切波的测定以及用弹性波层析成像对地球内部进行三维填图来进行研究。这方面的研究已获得地幔圈与地核圈具有不同运动速度的重要成果。运用航天卫星测量技术对海平面（大地水准面）形状的卫星射线测量，将有可能确定地幔中的密度和速度异常区的边界。通过对不同时代、不同地区地幔岩石的微量元素及 Pb、Sr、Nd、He 等同位素精确测定等地球化学的研究，可获取地幔不均一性及其在各处演化的信息。由于在金刚石压砧中已经可以获得高达约 560×10^{6} kPa 和 3000℃的实验条件。因此，已有可能进行地幔，甚至地核条件下物质状态的实验，并进行物理和化学性质的测定。

7.2.4 全球岩石圈研究

对岩石圈的研究在国际上始终是一个热点，国际岩石圈计划（ICL）已经执行了近二十年。围绕岩石圈物质、结构、构造、动力学、演化、造山带、俯冲带、大洋岩石圈、大陆岩石圈、地球动力学等都进行了大量的研究，并向着跨学科综合研究方向发展，进行定性和定量的研究固体地球岩石圈及其表面特征演化的运动学和动力学过程。当今及今后一段时期内，岩石圈的研究明显地从海洋区域转向大陆地区，大陆岩石圈动力学研究将成为重点。

60 年代建立板块构造学说以来，大洋岩石圈的研究已取得较大进展，大洋岩石圈已分出四层：第一层是 5km 深水层，第二层是沉积层，第三层是镁铁质和超镁铁质喷发岩和侵入体，二者厚度约 6km，第四层是橄榄岩。已经建立了大洋岩石圈的运动模式，即按板块构造学说的推断，在洋中脊有下伏地幔物质的上涌，使原有的岩石圈物质向两侧推移，并大约在 200Ma 内又重新插入大陆板块底下，进入地幔消融。而在洋中脊中发现了含矿物质的气液喷流，形成金属硫化物堆积物构成的“黑烟囱”和硅质、碳酸盐堆积的“白烟囱”。这无疑对进一步研究大陆内古老地质历史时期中在海相条件下形成的块状硫化物金属矿床是有启发的。板块构造学说提出的一套岩浆活动及成矿活动模型已比较成熟，并广为应用。运用板块构造学说研究及恢复在大陆内中生代以前的板块运动亦取得了很大进展。但是，以海洋岩石圈运动规律而构成的板块构造学说，并不能解释大陆内的一些地质构造与岩浆成矿事件，特别是涉及大陆内部由深部作用而引起的构造、岩浆、成矿活动，更不能解释在大陆上前寒武纪的构造运动性质及动力学。

大陆在地球表面是一个非常重要的地质单元，是从地球形成后，始终保留并不断发展、演化的部分，是地球历史的“博物馆”。它具有厚大的地壳，具有多构造层的地壳结构，其岩石圈结构与物质组成与大洋的有本质的区别。大陆岩石圈内的深部运动与动力学是板块构造学说尚未涉及的领域。因此，把大陆作为一个独立系统来研究，是当前地学界的共识。美国国家科学基金会地球科学部决定 1990～2020 年历时 30 年实施“大陆动力学计划”。大陆系统是由大陆地壳、地壳之下的岩石圈和软流圈，以及大陆演化过程中残留下来的大洋沉积物、岛弧、海台和边缘海盆等构成的堆积块体组成。因为大陆地壳厚度大，地壳深部温度的上

升在大陆岩石圈内部会形成3～4个力学边界层或变动带，有时体现为一些低速层，它们控制着大陆地质构造的演化，并形成大陆深部特有的非常复杂的多层次叠覆构造（或鳄鱼构造）及一些熔融层（房），这些都是板块构造学说尚未涉及的领域。因此，对大陆动力学的研究，将推动全球岩石圈动力学体系的建立，意义是很明了的。

当前，大陆动力学研究需要重视的若干重大问题是：大陆岩石圈物质组成与结构；大陆边缘带；大陆造山带，包括大陆碰撞带、超高压带的研究；大陆裂谷带；大陆内沉积盆地形成、演化及动力学研究；大陆新构造研究；大陆地壳内部板片的叠覆构造以及伸展造成的层状构造运动学、动力学研究；大陆岩石圈内地幔柱、熔融体的形成机制及时空分布；大陆科学钻探及大陆地学深剖面等研究。

7.2.5 地质流体研究

地质流体是地球表层地壳、岩石圈、地幔中最活跃的组分，包括气、液及熔体相在内的流体，包括地球内部产生的流体与表生的流体。地质流体对地球中物质与能量重新分配起主导作用。地壳中的岩浆作用、变质作用、成矿作用、构造作用、地幔蠕变、乃至软流圈的形成和运动，都是在流体参与下实现的。地质流体在研究地球动力学、解决资源、环境、灾害等人类面临的重大问题方面起着关键作用。因此，对地球内地质流体的研究被地学界列为优选的研究方向。美国国家研究委员会提出固体地球科学五个优先研究主题中，地球内部流体研究列第三位。英国也将地质流体研究作为其规划中最重要的课题之一。

在地壳或地幔不同构造部位及环境中不同性质和活动形式的流体都起着各自重要的作用。

在盆地和大陆边缘沉积物中的大规模流体循环，对一些关键元素、化合物的化学循环有着直接影响。构造的条件、岩石的物理、化学性质、流体的成分影响循环期间化学反应的性质。作用过程涉及到无机与有机沉积物、孔隙度和流体力学的一整套相互关系，并有可能形成油气圈闭、沉积矿床的堆积等。

在近地表、山区及地壳深部由于流体的活动造成地下水源的污染、滑坡、泥石流及地震的触发等环境问题。深部的流体通过火山、地震等通道进入地表生物圈、大气圈。火山的喷发，造成对人类环境和全球气候变化有重大影响的CO_2、SO_2、Cl、F等有害气体及H_2和CH_4等的排放。

地幔柱的上侵，地壳局部熔融成岩浆，在大陆板块边缘洋壳俯冲带下冲熔融，而形成岛弧岩浆活动带、大洋中脊来自地幔深部的玄武岩浆及高温含矿热流体的喷流等，地幔、地壳范围内的各种成分的岩浆流体的产生与活动，引起地球内部物质与能量的大规模迁移、再分配。在岩浆流动过程中对围岩的作用、形成的热晕、岩浆热液和气液与周围介质的作用，形成各种岩浆矿床、各种接触交代矿床、各种热液矿床、各种蚀变岩石带。尤其在大洋中脊及弧后扩张带发生深海热液成矿作用，形成块状硫化物金属、贵金属矿床以及锰铁多金属结核、钴结壳等海底沉积矿床。这对重新认识在大陆上古老地质历史年代中，在火山岩带内产出的块状硫化物金属矿床的成因有很现实的意义。

在地壳深部强构造挤压的高温高压条件下，有变质流体作用形成各种变质岩带及变质矿床，有的甚至形成超高压变质岩带及有关的矿床。

地幔岩石矿物中流体包裹体的研究，表明地幔含有CO_2、H_2O、CH_4、H_2、H_2S、SO_2、F、Cl等以及K、Na、REE及其他不相容元素组成的地幔流体，它们参与地幔、地壳的地质作用、成

矿作用。另外，在一些油气田发现非生物成因的天然气、CO_2、氦气藏，也都有可能是由地幔流体提供的物质来源。这亦是当前油气界研究的一个热点。

可见，地质流体的研究对揭示地球整体的物质组成、结构及动力学过程是一个十分关键的方面，而且对解决与人类社会紧密相关的资源、环境、灾害问题都有直接联系。这方面当前及今后需要研究的问题是：地质流体与环境、灾害及全球变化；地质流体与成矿作用；变质流体、地幔流体；地质流体运动及控制因素；地质流体与固体的反应，流体化学动力学；地质流体的探测；地质流体的实验研究，特别是临界状态流体性质及作用的研究。

7.2.6 大洋地质与资源研究

大洋地质研究自50年代以来已取得很大进展，由海洋地球物理工作所取得洋中脊两侧古地磁条带对称分布的资料后，说明了海底扩张的事实，导致了在60年代板块构造学说的提出。这一地学领域的重大发现，引起了地学界在这方面的研究高潮，并不断取得重大进展。例如，对大洋岩石圈的研究已达到较高的水平；对洋底的地貌、地质构造以及洋底的沉积物、岩石都做了仔细的工作，确定了洋底岩石最老年龄不超过2.2Ga，并越离中脊越老；对大洋板块与大陆板块之间的相关作用关系，动力学过程也获得了一系列重要的认识。可以说，目前对大洋岩石圈及其动力学的研究程度远高于对大陆岩石圈的研究。因此，国际地学界把研究的重点转向了大陆动力学的领域。但是这些年来，有一个重要的动向，即海洋的矿产资源引起越来越多国家的重视，这必然会成为地学界的重要研究方向。

继1873年英国"挑战者"号考察船在大西洋底发现铁锰多金属结核矿产之后，在20世纪掀起了调查与研究多金属结核的高潮。1978年美国在加利福尼亚海湾口的太平洋海隆（洋脊）发现了海底热液多金属硫化物矿，后来经工作，这类矿床分布于大洋中脊扩张中心地带及弧后盆地、岛弧地区。深海钻探计划(DSDP)于1979年在美国东海岸大西洋海域与东太平洋中美洲海槽的深海钻孔岩心中发现了天然气水合物，引起了各国的高度重视。1982年美国又在太平洋海山山坡上发现了富钴结壳。上述一系列的发现，对于缓解世界上矿产资源所面临的危机无疑是一个福音。面向海洋矿产资源的探索与研究将掀起一个新的高潮。

新发现的海洋底部沉积物中的天然气水合物最为吸引人，这是一种碳氢气体（95%是甲烷气体）和水分子结合而成的冰状结晶固体化合物，是在低温（0～10℃）和高压（$>100\times10^5$Pa）条件下形成，一般在水深大于300～500m的地带具有这种温压条件。天然气水合物中甲烷体系和水分子体积之比为164：1，即每立方米的天然气水合物含有163 m^3 的甲烷和0.8 m^3 的水，天然气水合物的能量密度是煤的10倍，是天然气的2～5倍。据估计，具有形成海底天然气水合物的海域约占世界大洋面积的10%，大致为4000×10^4 km^2。据估算，世界天然气水合物资源量约为$1.8\times10^{16}\sim2.1\times10^{16}$ m^3。仅大西洋布莱克海台已发现的天然气水合物中甲烷可满足美国105年的天然气需求量。

海洋中的富钴结壳是一种分布在水深300～3000m的海山、海台及海岭的顶部和斜坡上的结壳状自生沉积矿产，由铁锰氧化物组成，富含Mn、Cu、Ni、Co、Pt及稀土元素，以富含钴、铂为特点。据估计仅在太平洋地区的专属经济区内富钴结壳潜在资源量不少于10×10^8 t，钴资源量就有$600\times10^4\sim800\times10^4$ t，而钴在大陆是比较稀有的矿产。在洋中脊及弧后盆地等处分布的热液多金属硫化物矿床是Cu、Pb、Zn、Au、Ag矿床，有的金属含量很高，亦有很大的资源远景。

这些海洋中的矿产资源吸引了各国的关注，一些发达国家都已经开展调查，以求获取勘

查、开采权，发展中国家印度亦始终不间断地进行这方面的工作。我国从80年代开始开展了对大洋矿产资源的调查，并已在东太平洋区获得 7.5×10^4 km^2 的金属结核开采区，开始了对钴结壳的调查。因此，随着对海洋矿产资源调查工作的展开，必定会带动对海洋矿产资源有关的海洋地质成矿规律及地质环境的进一步研究，这亦是地学界开展海洋地质矿产研究的好机遇。因此，作为一个重要的研究方向是理所当然的。在这方面需要侧重研究：①各类矿产资源形成的地质环境、成矿动力学、成矿物质来源及成矿规律；②成矿与海洋岩石圈活动的关系；③成矿区带海底结构等。

7.2.7 矿产资源与开发

矿产资源是人类社会存在与发展的基础，是各国经济一刻都不能离开的因素。矿产资源枯竭的危险不停地向人类社会走来，为了寻找和开发足够多的矿产资源，保证人类社会可持续发展，社会要求地学界把矿产资源及其开发的研究作为长期的重要研究方向。国际地学界和世界各国政府都是这样安排的。

矿产的发现与利用是与人类的形成、人类社会的发展同步。矿床学科是在找矿实践中逐渐成长，不断探索、不断完善。成矿学说经过一个多世纪的“水”(水成论)与“火”(火成论)之争，形成了三大类成矿作用的理论，即沉积成矿作用，包括风化壳等表生成矿在内；岩浆成矿作用；变质成矿作用。在这个领域近一时期又提出了非岩浆成因的地壳热流体成矿及生物作用成矿的研究方向。

在区域成矿规律研究方面历来重视成矿与构造、建造的密切关系。因此，先后提出各类建造成矿的理论体系、各类构造成矿的体系，例如槽台构造成矿说、多旋回构造成矿说、地洼构造成矿说。而60年代以来提出的板块构造成矿学说，目前在矿床界具有重大影响。但是板块构造成矿说尚难以解释大陆成矿问题。因此，大陆成矿动力学的研究已成为当前矿床界研究的热点，全球构造成矿体系的建立将是追求的目标。

对矿床的研究，近几十年来取得很大的进展。由于同位素、稀土元素、微量元素及矿物包裹体地球化学研究的发展，对成矿物质的来源、迁移及聚集这些根本性的成矿问题的研究有很大进展；近一、二十年来，对大型、超大型矿床的研究由于其具有重大的经济意义，而成为国际矿床界共同的重点，目前的趋势是向成矿密集区进行研究的转移；为了更好地指导找矿，从60年代起对重要矿床及矿床类型建立成矿模式成为矿床界研究的热点，建立的斑岩铜矿模式、黑矿模式、卡林金矿模式等都对指导找矿起到重要作用。目前，这个方向的研究已向建立区域矿床成矿模式、建立区域时空演化的四维空间的区域性的矿床成矿系列方向发展，并向区域与全球成矿规律研究方向接轨。

开拓矿产资源新领域一直是矿床学界关注的问题。半个多世纪以来在海洋矿产资源的探索方面取得巨大成绩，如在前一节中已论述的洋底多金属结核、钴结壳、块状硫化物以及浅海区天然气水合物的发现，为人类提供了丰富的有关的矿产资源。为适应新材料的需要，利用矿物、岩石的特殊的物、化性能，开拓新的非金属矿产资源已引起矿床界高度重视，并有可能实现使用新型的非金属矿产资源代替金属矿产资源。

矿产勘查的技术、方法研究，提高找矿的命中率是矿床界研究的重要方向。目前的关键是要对寻找隐伏矿提出有效的找矿方法与技术，其重要的发展方向是：①提高地质、物探、化探、遥感方法技术找矿水平，提高提取成矿信息的水平，排除干扰因素。在这方面，化探方法取得了引人注目的突破，由谢学锦提出的深穿透地球化学找矿方法对在隐伏区寻找有色金

属与贵金属矿床显示了美好的前景。而地质方法的提高，关键是提高从事找矿工作的地质技术人员的业务素质。②进一步完善成矿预测的理论与方法。矿产勘查工作经过了人找矿、方法技术找矿与理论找矿的时代，现已进入信息找矿时代。这个时代的标志是运用各种先进的地质理论、技术与方法，获取各种信息，通过人与计算机的结合，综合、合理、快速地进行分析，最佳地部署与指挥地质找矿工作，以取得最佳的找矿效果。因此，建立与完善综合信息成矿预测的理论与方法，充分发挥计算机技术在找矿工作各阶段中的应用是重要研究方向。

对于矿产资源的研究看来亦要考虑地球之外的因素，一方面随着航天技术的发展，人类有可能登上其他星球，随着空间科学的发展，对各类天体认识的逐步深化，使地学工作者要现实地考虑对有可能被利用的星体，如月球矿产资源的调查与研究。这方面已有的信息是月球土壤中有丰富的氦-3资源，数量可达 100×10^4 t。这是一种核能资源，几十吨的氦-3聚变就能产生供全球一年的能源的需要。另一方面，在研究成矿作用时，亦要考虑在地球发展历史中，外来天体对地球的撞击而引起的对成矿的影响。

对成矿过程的模拟实验研究，随着新材料、新技术的发展，需要不断改进实验装置。加强在岩浆体系中成矿物质聚集、迁移、堆积的研究；加强对在临界状态下成矿流体的状态及成矿物质在此体系中的行为的研究；加强对低温条件下成矿作用的实验研究。

对矿产资源领域需要研究的方面很多，我们认为需突出以下重点：①成矿动力学研究，特别要加强大陆成矿动力学研究，建立大陆成矿体系，同时进一步开展海洋成矿动力学研究，最终建立全球成矿体系；②开展区域性大规模成矿作用、成矿密集区及巨矿形成规律的研究；③在矿床成矿模式研究的基础上，开展区域性具有四维结构的成矿系列的研究，建立区域成矿谱系，并向建立全球成矿谱系发展；④开展矿产资源新领域的研究；⑤进一步开展矿床同位素、微量元素、稀土元素、矿物包裹体地球化学及成矿年代学研究；⑥开展矿产勘查新技术、新方法研究和计算机技术在矿产勘查各阶段的应用研究；⑦加强矿产资源综合利用技术研究；开展矿产成矿预测的理论与方法研究，特别是矿产勘查综合信息预测与评价 GIS 系统的建立；⑧进一步进行成矿的实验研究。

7.2.8 水资源研究

水资源问题是世界性的问题，世界面临水资源危机。据估计，地球上易于开采的供人类使用的淡水量每年约为 9×10^{12} m³，加上水坝和水库拦住和蓄存的 3.5×10^{12} m³，共 12.5×10^{12} m³ 的水，人类大约使用了其中的一半。目前，世界上有15亿人缺少饮用水，水体污染日益严重，许多地表水无法使用，地下水的开采日益增加。在80～90年代，全球地下水开采量为每年 55×10^{10} m³。

我国是一个水资源大国，整个大陆每年平均降水量约为 6.19×10^{12} m³，但其中约55%消耗于地面蒸发，只有45%转化为径流和地下水，实际利用率不到10%（约 500×10^9 m³）。我国水资源总量 2.8×10^{12} m³，居世界第6位。但人均占有量为2300 m³，占世界人均值的不足1/4，世界排名第110位，被列为世界13个人均水资源缺乏的国家之一。到目前为止，农林业缺水 300×10^8 m³ 左右，城市缺水 60×10^8 m³。全国有300多个城市缺水，其中188个城市严重缺水。

除了自然条件外，由于对水资源的利用与管理不当，存在水资源的严重浪费，如传统的农业漫灌方式，工业用水的利用率低下，回收利用率又低，仅20%～50%（国际上一般70%～90%），地下水过分抽用造成地面沉降，地表水使用不当造成草场退化、土地盐渍化、荒漠

化，大量河流、湖泊及地下水的污染，有的水源水质不良，造成区域性的地方病等，使水资源问题更趋严重。

面临人类社会生存的如此重大的水资源问题，地学界应当作为自己重要的研究方向，为提高水资源的供应量、合理利用水资源作出应有的贡献。因此，提出以下方面可作为重点研究的方向：①大陆水圈循环系统与淡水资源可持续开发模式研究，通过对循环系统运行、演化规律的研究，提出对各种景观区域淡水资源开发利用的指导；②重点开展对干旱、半干旱地区、岩溶石山地区、黄土地区地下水赋存及运行规律的研究，指导这些地区地下水的寻找及合理开发；③加强找水新技术、方法的研究及应用；④开展对已有地表河流、地下水资源总体规划及全国水资源合理调配的地质调查与论证，为国家中、长期规划，充分利用已有水资源服务；⑤系统开展全国水资源监测、监控，特别是对地方病区，加强水质的监控，对发现水质异常的地区开展成因及防、治的研究；⑥开展矿泉水、温泉及其开发利用的调查研究。

要促进政府部门加强对水资源的管理，建立节水型社会作为基本国策，要制定政策促进提高工业、农业用水的效率；防止及治理江、湖、地下水的污染，保护水源；加强水资源立法。

7.2.9 土壤和可耕地研究

土地是人类赖以生存与发展的物质基础与条件。人类实现对土地的可持续利用，全面提高土地利用效率与效益，已成为各国政府及科学界的共识。世界人口的增长及社会消费水平的提高，导致对土地特别是耕地的需求压力越来越大，致使世界人均耕地面积从70年代的0.52 hm^2 减少到20世纪末的0.28 hm^2。我国的情况则更为严峻。我国现有耕地 1.30×10^8 hm^2，人均耕地0.1 hm^2 左右，为世界人均的37%，人均低于联合国粮农组织确定的0.05 hm^2 警戒线的有666个县级行政单位，占全国同类单位的23.7%。我国耕地质量也比较差，二、三等的耕地占了60%。

对于这个涉及国家农业，重大国计民生的大事，地球科学能够为此做出什么贡献？历来土壤是地学研究的领域，土壤是组成耕地的基本物质。地学在为农业服务方面已经初步形成了由土壤学、元素地球化学、水文地质学与生物学以及农业科学相结合的边缘科学——农业地质学。显然地学界应当把这个方面作为需要重点发展的研究方向，以满足人类社会生存与发展的需要。需要重点研究的内容是：

土壤的形成、物质组成、物理性质与农业生物生长的制约关系，这方面过去已有不少成功的研究，可以为不同成因类型的土壤提供可供选择的最适应种植的农作物，可以提出为提高农作物产量需要给土壤补充某些特定的微量元素或掺杂某些矿物、岩石添料，进行土壤的改良。开展这方面的研究在我国应当说已具备了基础条件，全国已在 570×10^4 km^2 国土面积内进行了1：20万区域地球化学调查，已取得3000多万个水系沉积物样品的39种元素的分析资料，充分开发这些资料，将为研究这方面的内容提供重要基础。另外，通过土壤元素地球化学与农作物生长关系的探索，开拓发展农业的途径。

加强矿物肥料的地学研究，对我国来说特别要加强代替可溶性钾盐的钾肥的研究。我国耕地的氮、磷肥力有余，而钾含量严重亏缺，据统计每亩亏缺 K_2O 2.3kg。过去对钾长石岩、绿豆岩等含钾岩石使其转为可溶性钾肥做过不少工作，但都因经济上不合算而搁置。当然进口钾肥是一条已经在走的道路，在此同时，再继续做一些新的技术加工探索亦是需要的。另外，开辟新的矿物肥料及改良土壤物理性质的矿物原料还有很大的余地。

地学研究除为改良土壤、探索土壤元素地球化学性质与物理性质对农作物生长制约关

系，以提高耕地肥力及指导农作物生产外，对大农业的发展方面，特别是饲养业的发展方面，在矿物饲料的研究方面也有广阔的领域。

对于耕地的保护，有效地使用耕地，扩大耕地，防止水土流失、沙漠化、盐渍化，防止洪灾、旱灾等方面，地学从水文地质、工程地质、环境地质等角度都需开展专门的研究，来给以支持，为政府和有关决策部门进行规划、采取防范措施，及时地提供科学依据。

地学研究应当在为农业服务方面开拓出一个大世界，形成一个重要的分支学科，这应当是当代地学发展的重要方向。

7.2.10 全球变化研究

这是一个极其庞大的，又是非常重要的研究问题。问题提出的直接原因是地球环境的日趋恶化，对人类社会造成严重威胁。但要搞清产生的原因，采取有效对策，仅从地球的某一个方面去研究都不能解决问题，必须从地球环境这个整体上来寻求解决的方法，从而产生了地球系统科学的概念，也就是把大气圈、水圈、生物圈、岩石圈联系起来，作为一个整体来进行全球变化的研究。研究这些层圈和人类活动相互作用，相互影响的全过程，以解决人类面临重大环境和生态问题的实际需要。对地球科学来说从此要突破"固体地球"这个研究领地，参与各层圈间的作用研究，从而体现了地球科学本身发展的需要。

全球变化的研究已成为国际性的重大研究问题，是国际科学的前沿研究领域，已经实施了三个彼此独立又相互联系的重大国际研究计划：世界气候计划（WCRP），主要研究与全球气候有关的物理过程；国际地圈-生物圈计划（IGBP），主要研究全球环境变化有关的生物地球化学过程及其与物理过程的相互作用；全球环境变化的人类因素研究计划（HDP），主要研究人与环境的关系。

全球变化研究的发展趋势是：在地球系统基本概念的基础上，开展多学科的地球环境的集成研究，发展较为完整的包括地球系统各组成部分（气、水、土[石]、生）之间相互作用和物理、化学和生物过程相互作用的地球系统的模式；建成完整的全球监测系统；建立起具有预测能力的全球和区域的环境模式；对重大环境变化问题提出科学对策。

中国的全球变化研究已经在古环境、古气候研究，灾害事件的预测与防治，全球变化适应研究，驱动力研究，痕量气体监测和机理研究，极地研究等方面进行了大量工作。对于今后的研究方向，国际地圈-生物圈计划中国全国委员会主席陈宜瑜在最近召开的工作会议上提出了以下主要内容：全球变化与可持续发展适应研究；全球变化与国家安全研究；地球系统演化关键过程和机理研究，主要包括：过去1万年、2000年时间尺度上人与环境变化作用过程及关键事件成因研究，过去300年土地利用和土地覆盖变化过程和驱动力问题，大气中痕量气体的温室效应问题，气溶胶的"阳伞效应"，海洋中的物理过程和生物地球化学过程，生物在全球水循环中的作用；自然系统和社会系统相互作用研究；预测研究；数据收集和共享。

虽然在全球变化研究中优先研究的是现代几十年到几百年时间尺度内的主要相互作用和重要全球环境变化，但当代环境是过去环境演化的结果，有一个演变的客观规律及趋势，这正是可以被人类掌握并用以预测未来的钥匙。因此，对地学界来说，一方面与气象、生物、海洋等学科结合研究当前和近期发生在地表的环境问题，并对于表生的地质作用研究给以必要的加强外，同时要通过对冰心、深海沉积、湖泊沉积、岩溶沉积、黄土、古生物、典型地层剖面成分、同位素、古地磁等的研究，追溯1万年、10万年、20万年、200万年以及更古老的

地质年代环境的地质记录，研究其演变的规律，并在此基础上预测未来，为政府决策提供科学依据。

7.2.11 地质环境与地质灾害

地质环境与地质灾害是直接与人类社会生存与发展相关的地学问题，始终是地学研究的主要方向之一。

人类生活在地质环境之中，而地质环境是受自然因素和人类活动的作用和影响不断变化的。由于近代人口急速增加，人类自身的发展对自然的开发、改造、破坏活动空前增强，致使人类的生存发展面临地质环境恶化的严重威胁，地质灾害亦因人类的活动而不断加剧。因此，研究地质环境在自然因素和人类活动的作用影响下发生的变化及其规律，地质灾害发生的原因、预测、防治地质灾害的发生，成为地学界重要的研究方向，当代科学的一个前沿领域。

环境和环境保护，是当今国际社会共同关心的大事，继1972年6月在瑞典斯德哥尔摩发表《联合国人类环境会议宣言》之后，1992年6月在巴西通过了《里约环境与发展宣言》和《21世纪议程》等重要文件。我国于1993年编制并公布了《中国21世纪议程》，把环境保护作为一项基本国策，成为国民经济与社会发展规划的重要组成部分。地质环境是广义环境中的基础部分，地质环境问题是环境问题中的重大问题。

我国由于地质环境条件及人为因素引发而发生的地质灾害，在世界上是属于最为严重的国家之一。由于我国地处环太平洋和欧亚地震带交汇地带，因此是构造地震多发区；有记载的地震达8137次，破坏性地震1004次，20世纪发生7级以上地震达80次，造成巨大的人员伤亡及经济损失。崩塌、滑坡、泥石流灾害在山区频繁发生，据初步统计，我国发生变形量大于100×10^4 m^3，死亡人数大于10人和直接经济损失大于100亿元的特大型崩塌51处、滑坡140处、泥石流149处；较大型的崩塌2984处、滑坡2212处、泥石流2277处；中小型的则更多，有迹可辨的达41万多处。地面沉降、地面塌陷、地裂缝、海水入侵、地下水污染、水土流失、土地盐渍化及土地沙化地质灾害十分普遍，一方面与水文循环有关触发了地质灾害，另一方面由于不当的兴修水利、地下水过分开发、地下矿山无序开采、工业废水任意排放、过度采伐森林等人为造成的地质灾害。另外，人类的固体废弃物对地质环境亦造成了很大的污染，例如我国每年工业固体废弃物约有6×10^8 t，城市生活垃圾约有1×10^8 t。可见，地质环境恶化威胁人类的生存与发展。地质灾害摧毁着人类的文明。开展对地质环境的研究，提高对各种地质灾害的孕育、发生、发展、演化及时空分布规律的认识，科学地进行预测、预报，提出防、治的对策，保护地质环境是地学界义不容辞的重要任务。

7.3 对当前一些国际合作项目的建议

地球科学是全人类的事业，人类生活在同一个地球上，探索为人类的生存与发展提供了环境与物质资源的地球的奥秘是全人类的任务与目标，地球科学工作者要联合起来，相互协作，对这个引人入胜的万世难题进行有效的研究。

中国是一个地质大国，但还不是一个地质强国，我们要进一步加强与各国的交流，我们有很多研究成果，需要与各国地学工作者交流，同时也有很多方面需要向各国地学界同仁学习。互通有无，取长补短，才能促进共同发展。我们更需要加强与各国地学界同仁合作研究，

直接沟通，共同探讨世界性的地学难题，希望在即将到来的新世纪中在这方面取得更大的进展。

我国与国际地学界合作的领域与内容十分广阔，当今国际地学研究的优选方向应当成为可供选择的热点项目。需要从3个方面来选择与国际的合作项目：第一类合作项目是合作研究我国的重大地质问题，这些问题同时亦是世界性的关键问题，但在我国具有最佳的可供研究的地质条件，并且已有一定的研究基础，如青藏地区大陆动力学研究、大别—苏鲁地区超高压变质带研究等；第二类合作项目是跨国研究项目，我国与各国科学家合作联合开展国内和国外的研究，如全球变化的国际研究计划以及大量的国际地质对比项目等；第三类合作项目是国内研究基础比较差的或尚未开拓的领域，争取参加到国外项目中去研究，如大洋科学钻探计划、深海矿产研究等。选择合作项目应当优先考虑目前已有相当合作基础，通过努力有望实施的项目。在上述的基本原则下，提出以下当前可进行国际合作研究的项目建议：

1)青藏高原岩石圈、大陆动力学研究

青藏高原是世界第三极，青藏地区是全球最新的陆内板块拼合地带，地壳最厚的地带，是研究大陆动力学的理想区。世界各国地质学家在这个地区已经进行了大量研究，都作为国际地学界重要的研究焦点之一，喜马拉雅地区国际地质讨论会频繁举行，研究工作不断深化。这个地区在我国亦始终是地学研究的重点，青藏高原地质、资源、环境、气象等国家级的研究项目不断，中法、中美等国际地学合作研究项目接连进行。已经取得一批重要研究成果。最近，又被国家批准开展“973”青藏高原地质、环境的基础研究项目。因此，在本区开展国际合作研究的国内基础亦比较好，是比较成熟的可供国际合作研究的项目。

2)大别—苏鲁超高压变质带研究

这个项目被当前世界地学界所共同注目，因为大别—苏鲁地区是世界上超高压变质带出露面积最大，研究条件非常好的地区，是研究陆内造山运动理想区。国内自然科学基金会和原地矿部均立有研究项目，已经取得一批研究成果，有较好的研究基础。

3)地学深剖面(大断面)研究

中国是大陆地质国家，研究大陆岩石圈具有较好条件，有很多陆内构造运动的关键地带，需要进行地学深剖面的研究。过去20年内，原地矿部、国家地震局、自然科学基金会等单位已先后组织完成了13条地学深剖面的研究。目前正在开展的有中美合作在西藏继续进行的第三阶段深剖面计划；由新疆305项目、国土资源部、国家地震局和自然科学基金会联合支持的新疆地学大剖面；中法合作的阿尔金地区的地学大剖面。今后，在这一领域尚有很大的合作余地。

4)大陆科学钻探

国家已经批准立项开展我国第一口大陆科学钻探工程，作为国家重大科学工程项目，并已选定在江苏的东海地区进行。本项工程亦已获得国际大陆科学钻探工程计划(ICDP)的支持，并将与国际合作进行。大陆科学钻探不但对探索地壳深部重大地质问题有十分重要意义，同时对钻探、测井、实验等一系列高新技术要进行引进与应用，将提高我国有关的地质研究探测技术。本次项目以及今后大陆科学钻探的项目开展国际合作对我国以及国际地学界都是十分必要的。

5)大洋科学钻探

国际上从1985年1月开始实施大洋钻探计划(ODP)，该计划已安排到2008年，研究地

球环境动力学，涉及地球的气候变化、海平面变化的原因、结果、沉积物、流体以及作为变化营力的细菌；地球内部动力学，涉及地球内部与外界的物质和热的交换、岩石圈的变形作用与地震。这方面研究的内容很重要，我国由于缺乏手段，过去没有开展这方面的工作。因此，参加到国际大洋钻探计划中去就很有必要。1997 年经国家批准，我国已作为大洋钻探计划的参加国，并且 1999 年已在我国南海进行了海洋钻探，我国以汪品先为首的一批地质专家参加了本项目计划的研究工作。这项合作计划必将促进我国对大洋重大地质问题的研究。

6)大洋环境及洋底矿产资源研究

海洋环境及洋底矿产资源研究是目前国际上研究的热点，因为这涉及人类社会的生存环境与未来的矿产资源。对洋底矿产资源的调查，发达国家已经做了很多工作，并不断发现新的资源，如继发现多金属结核之后，又发现钴结壳、喷流沉积的硫化物多金属矿、天然气水合物新能源等。有些国家，如俄罗斯、法国、日本等已有潜入水下 6000 m 处的载人潜水器，直接进行观察与采集样品。发展中国家如中国、印度等亦已开始这方面的调查。对于海洋岩石圈及环境的研究，在国际上有比较庞大的多国联合的合作计划，如大洋钻探计划、国际全球变化研究计划中的世界大洋环境实验(WOCB)、热带海洋和全球大气(TOGA)计划、全球海洋通量联合研究计划(JGOFS)、海岸带陆地-海洋相互作用计划(LOICZ)、全球海洋生态系统动态研究计划(GLOBEC)。在大洋环境与矿产资源研究领域，我国与国际当前的研究水平相比有一定差距，需要积极地争取参加国际的联合研究，或与有关国家联合研究。

7)南极、北极地质环境研究

对南极的研究我国已有了起步，建立了两个考察站，进行长年的研究，并取得引人瞩目的研究成果，有了立足之地。而对北极的研究还刚准备起步。在对极地研究的领域里与很多国家比，我们有较大差距。因此，在独立自主地开展这方面研究的同时，努力争取通过各种途径与有关国家进行合作研究或参与其他国家的研究是很有必要的。

8)地球深部、内部实验研究

这是一项很重要的基础性研究，中国作为地质大国显然需要进行这方面的工作。国内在这个领域先后亦进行了研究，但与国际相比，总体上差距较大。国家需要有重点地支持在这方面研究工作有基础的单位及科学家与国外相关的著名的研究单位与科学家开展合作研究或参与研究，以促进本领域在我国的发展。

9)矿产资源的研究

这是一个很大的研究领域，由于矿产资源在全球分布的不均一性，因此各国往往都有一些为别国所缺乏或不甚发育的矿产资源和成矿的地质环境，以及有关的成矿规律。世界矿床界都有共同的愿望，希望加强彼此的交流，开展合作研究。1963 年成立的国际矿床成因协会在这方面做了很多促进工作。我国虽是矿产资源大国，有世界上独占优势的稀土、钨、锑、菱镁矿、滑石、叶蜡石等矿产，但不少矿产，如油气、铁、铜、铬、铂、钾盐、黄金、金刚石等矿产是贫缺的，而有一些国家如南非、澳大利亚、智利、加拿大及海湾国家等在这些矿产上有突出的优势。因此，我国也十分需要与各国开展各自所需的合作研究。过去，在改革开放的 20 年内，这方面已有很大的进展，今后仍需进一步加强。

10)全球变化研究

这是全世界的研究热点，而且必须由全球各国共同研究。《里约环境与发展宣言》表达了世界各国对全球环境的关心，它为开展全球环境研究国际合作打下了坚实基础。而全球变化

的研究实际上就是研究全球环境这个核心内容。国际上已有庞大的全球变化研究计划，我国已经参加了计划项目。我们需要把国内的研究与国际计划项目很好地结合，以便更有效地开展研究。

主要参考文献

卢良恕．1997．加快农业现代化建设，推动农业持续发展．见：周光召，朱光亚主编．共同走向科学．北京：新华出版

卢炬甫．1996．恒星的终局与黑洞的确认．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．

朱兆良．1997．施肥与农业和环境．见：周光召，朱光亚主编．共同走向科学．北京：新华出版社．

朱德举，1998．中国土地科学的发展现状与展望．见：周光召主编．科技进步与学科发展．北京：中国科学技术出版社．

曲焕林，程莉蓉主编．1998．人类生存的地质环境问题．北京：地质出版社．

刘若新．1996．地球内部流体研究．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．

杨戟．1996．恒星形成问题．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．

陈建生、王绶琯等．1996．天文学．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．

陈梦熊．1997．水资源的合理开发利用与社会经济可持续发展．见：周光召，朱光亚主编．共同走向科学．北京：新华出版社．

欧阳自远．1996．地球原始不均一性及对成矿与构造演化的制约．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．

张宗祜，殷正宙．1998．环境地质与水文地质学．见：周光召主编，科技进步与学科发展．北京：中国科学技术出版社．

张新时．1997．全球变化中的陆地生态系统研究．见：周光召，朱光亚主编．共同走向科学．北京：科学出版社．

胡文瑞，吕达仁等．1996．空间科学．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．

黄荣辉，王明星．1996．气候系统动力学和年际、年代际气候变化预测研究．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．

符淙斌，欧阳兵．1996．全球环境和生物圈动力学问题．见：21世纪初科学发展趋势．北京：科学出版社．